
Bachelorarbeit

Herr
Marcus Zaak

**Bemessung einer Kranbahn
nach DIN EN 1993-6**

Rosswein, 2013

Fakultät Maschinenbau

BACHELORARBEIT

Bemessung einer Kranbahn nach DIN EN 1993-6

Autor:

Herr

Marcus Zaak

Studiengang:

Stahl- und Metallbau

Seminargruppe:

SM07w1-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner

Zweitprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Torsten Laufs

Einreichung:

Rosswein, **11.11.2013**

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, **10.12.2013**

Bibliografische Beschreibung:

Zaak, Marcus:

Bemessung einer Kranbahn nach DIN EN 1993-6. - 2013. - X, 113 S.

Rosswein, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau, Bachelorarbeit, 2013

Referat:

Im Umfang dieser Arbeit soll der Kranbahnträgnachweis nach den neuen einheitlichen europäischen Normen, den Eurocodes, dargestellt werden. Dazu werden die Einwirkungen nach DIN EN 1991-3 und relevante, auf ein selbstgewähltes Beispiel bezogene, Nachweise nach DIN EN 1993-6 vorgestellt. Anschließend werden die charakteristischen Einwirkungen ermittelt und ein geeigneter Trägerquerschnitt ausgewählt und für diesen die vorgestellten Querschnitts-, Bauteil- und Ermüdungsnachweise geführt.

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	I
II	Abbildungsverzeichnis	VII
III	Tabellenverzeichnis	IX
1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Zielstellung	1
1.3	Abgrenzung	2
2	Grundlagen	3
2.1	Begriffe	3
2.2	Bauarten von Kranen	3
2.2.1	Einschienen-Unterflansch-Laufkatzen	4
2.2.2	Brückenlaufkrane	4
2.2.3	Hängekrane	4
2.2.4	Schwenkkrane	5
2.2.5	Portalkrane	5
2.3	Antrieb und Radführung	6
2.4	Kranschienen	7
2.4.1	Allgemeines	7
2.4.2	Flachstahlschienen	8
2.4.3	Schienen der Form A/F	8
2.4.4	Schienenunterlagen	9
2.4.5	Schienenstöße	9
2.4.6	Montagetoleranzen	10
3	Berechnungsgrundlagen für Kranbahnträger	11
3.1	Sicherheits- und Nachweiskonzept nach Eurocode	11
3.2	Materialien	11
3.2.1	Grundsätzliches	11
3.2.2	Bruchzähigkeit	11
3.3	Einwirkungen	12
3.3.1	Allgemeines	12
3.3.1.1	Definition der Einwirkungen	12

3.3.1.2	Dynamische Vergrößerungsfaktoren	13
3.3.1.3	Hubklassen	13
3.3.1.4	Lastgruppen	15
3.3.2	Ständige Einwirkungen	17
3.3.3	Veränderliche vertikale Einwirkungen	17
3.3.3.1	Radlasten	17
3.3.3.2	Exzentrizität der Radlast	19
3.3.4	Veränderliche horizontale Einwirkungen	19
3.3.4.1	Allgemeines	19
3.3.4.2	Antriebskräfte	20
3.3.4.3	Horizontale Kräfte infolge Beschleunigen und Bremsen der Kranbrücke	21
3.3.4.4	Horizontale Kräfte infolge Schräglauf	23
3.3.4.5	Horizontale Kräfte infolge Beschleunigen und Bremsen der Laufkatze	26
3.3.5	Außergewöhnliche Einwirkungen	26
3.3.5.1	Pufferkräfte infolge Anprall des Krans	26
3.3.5.2	Pufferkräfte infolge Anprall der Laufkatze	26
3.3.5.3	Kippkräfte	27
3.3.6	Weitere Einwirkungen	27
3.3.7	Einwirkungen aus weiteren Kranen	27
3.4	Einwirkungskombinationen	27
3.4.1	Allgemeines	27
3.4.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit	28
3.4.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	29
4	Tragwerksberechnung	31
4.1	Berechnungsmethoden	31
4.1.1	Allgemeines	31
4.2	Schnittgrößenberechnung	31
4.2.1	Allgemeines	31
4.2.2	Statisches System - Einfeldträger mit zwei gleichgroßen Einzellasten	32
4.2.2.1	Maximalmoment um die y-y Achse	32
4.2.2.2	Maximalmoment um die z-z Achse	33
4.2.2.3	Querkraft	33
4.3	Querschnittsnachweise	34
4.3.1	Querschnittsklassen	34

4.3.2	Äußere Schnittgrößen	35
4.3.2.1	vereinfachte Annahmen - Tragwirkungssplitting	35
4.3.3	Beanspruchbarkeit von Querschnitten im Grenzzustand der Tragfähigkeit	36
4.3.3.1	Allgemeines	36
4.3.3.2	Querkraftbeanspruchung	37
4.3.3.3	Biegebeanspruchung	39
4.3.3.4	Beanspruchung aus Biegung und Querkraft	39
4.4	Lokale Nachweise	40
4.4.1	Radlasteinleitung	40
4.4.1.1	Lokale vertikale Druckspannungen	41
4.4.1.2	Lokale Schubspannungen	42
4.4.1.3	Lokale Biegespannungen im Steg infolge exzentrischer Radlasten	43
4.5	Stabilitätsnachweise von Bauteilen	45
4.5.1	Biegedrillknicken	45
4.5.2	Beulnachweise	47
4.5.2.1	Allgemeines	47
4.5.2.2	Beanspruchbarkeit des Steges unter Querbelastrung	47
4.5.2.3	Flanschinduziertes Stegblechbeulen	49
4.5.2.4	Beulnachweis der Druckflansche	50
4.6	Gebrauchstauglichkeitsnachweise	50
4.6.1	Verformungsberechnung	50
4.6.1.1	Vertikale Verformung	50
4.6.1.2	Horizontale Verformung	51
4.6.1.3	Begrenzung des Stegblechatmens	52
4.6.1.4	Nachweis für elastisches Verhalten	52
4.6.1.5	Schwingung des Unterflansches	53
5	Ermüdung	55
5.1	Allgemeines	55
5.2	Ermüdungsbelastung	60
5.3	Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$	51
5.4	Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{E,2}$	62
6	Konstruktive Gestaltung	65
6.1	Einfluss des statischen Systems	65
6.2	Querschnitte für Kranbahnträger	65

6.2.1	Allgemeines	65
6.2.1.1	Walzprofile	65
6.2.1.2	Schweißprofile	66
6.2.1.3	Zusammengesetzte Profile	66
7	Beispiel	67
7.1	Allgemeines	67
7.1.1	Allgemeine Angaben	67
7.1.2	Ermittlung der dynamischen Vergrößerungsfaktoren	68
7.2	Ermittlung der veränderlichen Einwirkungen	69
7.2.1	Veränderliche vertikale Einwirkungen	69
7.2.1.1	Vertikale Radlasten	69
7.2.1.2	Exzentrizität der Radlast	71
7.2.2	Veränderliche horizontale Einwirkungen	72
7.2.2.1	Antriebskräfte	72
7.2.2.2	Horizontale Kräfte infolge Beschleunigen und Bremsen der Kranbrücke	72
7.2.2.3	Horizontale Kräfte infolge Schräglauf	73
7.2.3	Außergewöhnliche Einwirkungen	75
7.2.3.1	Pufferkräfte infolge Anprall der Laufkatze	75
7.2.4	Zusammenfassung der charakteristischen Einwirkungen	76
7.3	Einwirkungskombinationen	76
7.4	Querschnittsauswahl	77
7.4.1	Vorbetrachtung	77
7.5	Querschnittswerte	80
7.5.1	Kranbahnträger	80
7.5.2	Kranschiene	84
7.6	Schnittgrößen	85
7.6.1	Aufteilung der äußeren Schnittgrößen	85
7.6.2	Schnittgrößenermittlung	86
7.6.2.1	Eigengewicht	86
7.6.2.2	Kraneinwirkungen	87
7.7	Querschnittsnachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit	88
7.7.1	Untersuchung der Querschnittsklassen	88
7.7.2	Querkraftnachweis	89
7.7.3	Spannungsnachweise	90
7.7.4	Lokale Nachweise	92

7.7.4.1	Lokale vertikale Druckspannungen infolge Radlasteinleitung	92
7.7.4.2	Lokale Schubspannung	93
7.7.4.3	Vergleichsspannung	93
7.7.5	Stabilitätsnachweise	94
7.7.5.1	Biegedrillknicknachweis	94
7.7.6	Beulnachweise	96
7.7.6.1	Beanspruchbarkeit des Steges unter Querbelastrung	96
7.7.6.2	Flanschinduziertes Stegblechbeulen	98
7.7.6.3	Beulnachweis der Druckflansche	98
7.8	Gebrauchstauglichkeitsnachweise	98
7.8.1	Vertikale Durchbiegung	98
7.8.2	Horizontale Durchbiegung	99
7.8.3	Begrenzung des Stegblechatmens	100
7.8.4	Schwingung des Unterflansches	100
7.8.5	Nachweis für elastisches Verhalten	100
7.9	Ermüdungsnachweis	101
7.9.1	Allgemeines	101
7.9.2	Ermüdungsbelastung	101
7.9.3	Ermüdungsnachweise	102
7.9.3.1	Nachweis für globale Längsspannungen	102
7.9.3.2	Nachweis für lokale Spannungen infolge Radlasten	102
8	Zusammenfassung	109
	Normen und Literatur	111
	Erklärung	113

II Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Begriffe/Komponenten	3
Abb. 2-2:	Zweiträger-Brückenlaufkran	4
Abb. 2-3:	Hängekran	5
Abb. 2-4:	Säulenschwenkkran	5
Abb. 2-5:	Wandschwenkkran	5
Abb. 2-6:	Portalkran	6
Abb. 2-7:	Laufgrad mit Spurkranz	6
Abb. 2-8:	Laufgrad mit Führungsrollen	7
Abb. 2-9:	Schiene Form A	8
Abb. 2-10:	Schiene Form F	8
Abb. 2-11:	Draufsicht Schienenschrägstoß	10
Abb. 3-1:	Einwirkungen auf Kranbahnträger	13
Abb. 3-2a:	Lastanordnung des belasteten Krans zur Bestimmung der maximalen Belastung des Kranbahnträgers	17
Abb. 3-2b:	Lastanordnung des unbelasteten Krans zur Bestim- mung der minimalen Belastung des Kranbahnträgers	17
Abb. 3-3:	Exzentrizität der Radlast	19
Abb. 3-4:	Antriebskräfte	20
Abb. 3-5:	Horizontale Kräfte längs zur Fahrbahn	21
Abb. 3-6:	Horizontale Kräfte infolge Beschleunigen und Bremsen	22
Abb. 3-7:	Definition des Winkels α und des Abstandes h	24
Abb. 4-1:	Einwirkungen auf Kranbahnträger	32
Abb. 4-2:	Culmannsche Laststellung	33
Abb. 4-3:	Tragwirkungssplitting	35
Abb. 4-4:	Definition der effektiven Lasteinleitungslänge l_{eff}	41
Abb. 4-5:	Ermittlung l_{eff} unter einem Lastausbreitungswinkel von 45°	42
Abb. 4-6:	globale und lokale Schubspannungen	43
Abb. 4-7:	Exzentrizität der Radlast	44
Abb. 4-8:	Beulwerte für verschieden Arten der Lasteinleitung	48
Abb. 5-1:	Streubereich einer doppellogarithmisch dargestellten Wöhlerkurve mit verschiedenen Wahrscheinlichkeiten P_A für das schadlose Überstehen	55

Abb. 5-2:	Spannungszeitverlauf am Konstruktionsdetail	56
Abb. 5-3:	Zählverfahren Reservoir-Methode	56
Abb. 5-4:	Spektrum der Spannungsschwingbreiten	57
Abb. 5-5:	Standardisierte Kollektive für Krane	57
Abb. 5-6:	Anzahl der Spannungsschwingbreiten bis zum Versagen	58
Abb. 5-7:	Ermüdungsfestigkeitskurve für Längsspannungsschwingbreiten	58
Abb. 5-8:	Spannungsschwingbreite für ungeschweißte Bauteile	62
Abb. 6-1:	Zusammengesetzte Profile	66
Abb. 7-1:	Daten der Kranbrücke	68
Abb. 7-2:	Statisches System	68
Abb. 7-3:	Kranlaufrad	73
Abb. 7-4:	Abmessungen des Schweißprofils	80
Abb. 7-5:	Laststellung für minimale Querkraft und die Einflusslinie	105
Abb. 7-6:	Laststellung für maximale Querkraft und die Einflusslinie	106

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Antriebssysteme	7
Tabelle 3-1: Nennwerte der Streckgrenze f_y und der Zugfestigkeit f_u für warmgewalzten Baustahl	12
Tabelle 3-2: Definition der dynamischen Vergrößerungsfaktoren	14
Tabelle 3-3: Empfehlung für Hubklassen und Beanspruchungsklassen	15
Tabelle 3-4: Lastgruppen und dynamische Vergrößerungsfaktoren im Grenzzustand der Tragfähigkeit	16
Tabelle 3-5: Lastgruppen und dynamische Vergrößerungsfaktoren im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und für den Ermüdungsnachweis	16
Tabelle 3-6: Werte für φ_5	21
Tabelle 3-7: Bestimmung des Schräglaufwinkels α	25
Tabelle 3-8: Bestimmung von $\lambda_{S,i,j,k}$ -Werten und Gleitpolabstand h	25
Tabelle 3-9: Bemessungswerte der Einwirkungen	29
Tabelle 3-10: Empfohlene Werte für γ -Faktoren	29
Tabelle 3-11: ψ -Faktoren für Kranlasten	29
Tabelle 3-12: Bemessungswerte der Einwirkungen	30
Tabelle 4-1: Teilsicherheitsbeiwerte für Beanspruchbarkeiten von Bauteilen und Querschnitten	37
Tabelle 4-2: Ermittlung der effektiven Lastausbreitungslänge l_{eff}	42
Tabelle 4-3: Imperfektionsbeiwerte α für die Knicklinien	46
Tabelle 4-4: Parameter für die Berechnung der Durchbiegung	51
Tabelle 5-1: Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mf}	60
Tabelle 5-2: Schadensäquivalenter Beiwert λ	62
Tabelle 5-3: Lastkollektivfaktor kQ	63
Tabelle 7-1: Zusammenstellung der charakteristischen Einwirkungen	76
Tabelle 7-2: maßgebende charakteristische Einwirkungen	86
Tabelle 7-3: charakteristische Schnittgrößen infolge Eigengewicht	87
Tabelle 7-4: charakteristische Schnittgrößen infolge Kranbetrieb	87

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Aufgrund steigender Anforderungen an Effizienz und Flexibilität moderner Produktionsstätten, sind Kranbahnanlagen in nahezu allen Industriezweigen im Einsatz. In geschlossenen Produktions- und Lagerhallen kommen dabei häufig Brückenlaufkrane zum Einsatz, welche die Lasten über die Kranbrücke in die Kranbahnträger übertragen. Bei dieser Art von Krananlagen werden die Kranbahnträger oft in die Tragkonstruktion der Halle integriert. Sie werden nicht nur zum Heben, sondern auch zur Beförderung von Gütern und Waren eingesetzt, ohne dabei die zur Verfügung stehenden Nutz- bzw. Produktionsflächen unnötig einzuschränken. Resultierend aus den veränderlichen Einwirkungen, sind Kranbahnträger wechselnden Beanspruchungen ausgesetzt, welche eine sogenannte Materialermüdung zur Folge haben können. Dabei kommt es zur Bildung bzw. zum Wachstum von Rissen an bestimmten Stellen im Tragwerk oder Bauteil. Als Folge dieser Schädigung kann eine Verminderung des Bauteilwiderstandes, bis hin zu dessen Versagen, auftreten. Daher ist bei der Bemessung von Kranbahnträgern neben den üblichen Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen ein Ermüdungsnachweis zu führen. Durch die Auswahl geeigneter Konstruktionsdetails kann bereits während der Tragwerksplanung die Basis für eine ermüdungsunempfindliche Konstruktion geschaffen werden. Durch die Einführung der Eurocodenormen sind einheitliche Konzepte Stand der Technik und bieten unter anderem neue Möglichkeiten für Entwurf, Bemessung und Berechnung von Kranbahnen.

1.2 Zielstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Vorstellung der in DIN EN 1993-6 geregelten Bemessung von Kranbahnen anhand eines Beispiels. Zuvor sollen Einwirkungen

nach DIN EN 1991-3 ermittelt werden. Die Auswahl eines geeigneten Kranbahnträgerquerschnitts soll anhand einer Vordimensionierung getroffen werden und einen tragfähigen, wirtschaftlich ausgelasteten Querschnitt liefern. Für den gewählten Querschnitt werden Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit als Querschnitts-, Beul- und Bauteilnachweise geführt. Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird die horizontale und vertikale Durchbiegung nachgewiesen.

1.3 Abgrenzung

Es werden ausschließlich auf dem Kranbahnträgerobergurt verkehrende Zweiträger-Brückenlaufkrane in geschlossenen Hallen betrachtet, auf andere Bauarten soll nicht detailliert eingegangen werden. Die Ermittlung der Schnittgrößen und alle Nachweise werden ausschließlich für einen als Einfeldträger ausgebildeten Kranbahnträger aus Baustahl S 235 durchgeführt, welcher von einem Zweiträger-Brückenlaufkran mit zwei gleichgroßen Radlasten befahren wird. Kranbahnstützen, Auflager, Trägerstöße, Quer- oder Längssteifen und andere Bauteile werden nicht untersucht.

2 Grundlagen

2.1 Begriffe/Komponenten

In Abb. 2-1 sind die Hauptbestandteile eines Zweiträger-Brückenlaufkrans dargestellt.

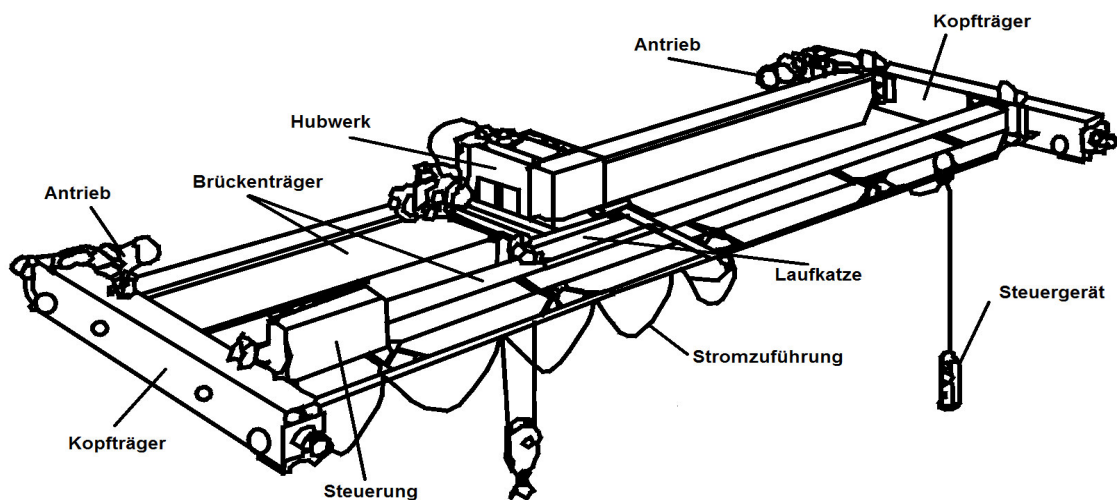


Abb. 2-1: Begriffe/Komponenten, eigene Zeichnung nach [3], Bild 1.1

2.2 Bauarten von Kranen

Krane werden anhand ihrer Verwendung und ihrer Bauart unterschieden. Häufig kommen folgende Bauarten vor:

- Einschienen-Unterflansch-Laufkatzen
- Brückenlaufkrane
- Hängekrane
- Schwenkkrane
- Portalkrane

2.2.1 Einschienen-Unterflansch-Laufkatzen

Bei dieser sehr kostengünstigen Ausführung mit Tragfähigkeiten bis zu 10 t, läuft ein Hubwerk auf dem Unterflansch eines Trägers, der fest in ein Gebäude integriert ist, bzw. an Brückenträgern von Hängekranen oder Brückenlaufkränen, auf Grund dessen ist ein Einsatz als selbstständige Anlage nur entlang einer Trägerachse möglich.

2.2.2 Brückenlaufkrane

Diese Bauform besteht aus einem bzw. zwei Brückenträgern (Kranbrücke), Kopfträgern, Laufkatze und Hubwerk. Die mit dem Hubwerk verbundene Laufkatze kann entlang der Kranbrücke bewegt werden, welche auf die Kopfträger aufgelegt bzw. dazwischen eingehängt werden kann. Über die Kopfträger überträgt die Kranbrücke die Lasten auf die Schienen und die Kranbahnträger, auf denen die gesamte Kranbrücke verfahrbar ist. Unterschieden wird in Einträger-Brückenlaufkrane, meist mit Unterflanschlaufkatze, bei geringen Stützweiten und Tragfähigkeiten bis 10 Tonnen, oder Zweiträger-Brückenlaufkrane, mit aufgesetzter Laufkatze, für Tragfähigkeiten bis 120 Tonnen und große Stützweiten.

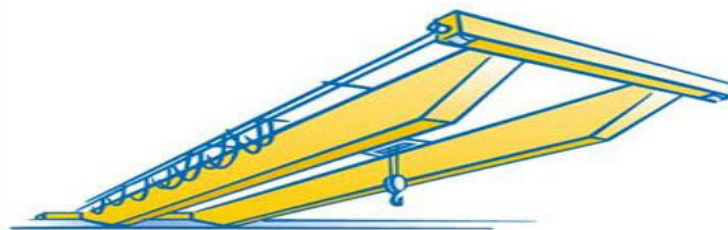


Abb. 2-2: Zweiträger-Brückenlaufkran [16]

2.2.3 Hängekrane

Hängekrane werden auch als Deckenkrane bezeichnet, diese Brückenlaufkrane fahren auf den Unterflanschen der Kranbahnträger. Die Kranbrücke wird meist

an der Deckenkonstruktion abgehängt. Damit entfällt die Notwendigkeit separater Kranbahnstützen und es kann die gesamte Hallenfläche genutzt werden.



Abb. 2-3: Hängekran [17]

2.2.4 Schwenkkrane

Schwenkkrane bestehen aus einem Schwenkarm und einem daran entlang laufenden Hubwerk, dadurch lassen sich (halb-)kreisförmige Flächen bedienen, weshalb die Bauform eher lokal z.B. an Verladeplätzen eingesetzt wird. Ist der Schwenkarm an eine Gebäudewand bzw. bestehende Tragwerksteile angebracht, spricht man von Wandschwenkkranen. Bei den sogenannten Säulenschwenkkranen wird der Schwenkarm an einer eigenen Stütze montiert.

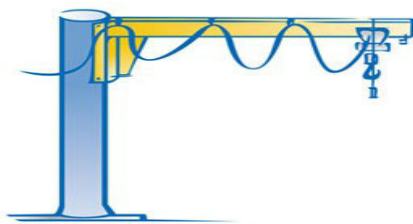


Abb. 2-4: Säulenschwenkkrane [18]



Abb. 2-5: Wandschwenkkrane [18]

2.2.5 Portalkrane

Hauptbestandteil eines Portalkrans ist ein Rahmen, entlang dessen Riegel die Laufkatze bewegt werden kann, oft mit am unteren Ende der Stiele angebrachtem Fahrwerk. Zum Einsatz kommt diese Bauform häufig auf Lager- und Umschlagplätzen.

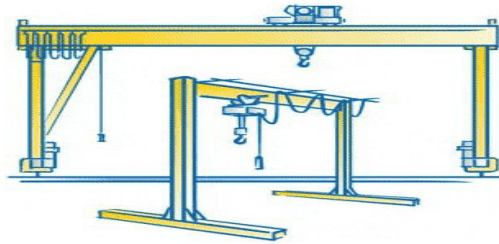


Abb. 2-6: Portalkran [19]

2.3 Antrieb und Radführung

Bei den Antriebsarten für Brückenlaufkrane unterscheidet man zwischen zwei Varianten. Einerseits können die Laufradpaare mittels eines Zentralantriebes verbunden sein, d.h., dass die Laufräder die in einer Kranachse liegen mechanisch oder elektrisch drehzahlgekoppelt sind. Andererseits sind ebenso Einzelradantriebe möglich, wobei dann die entsprechenden Laufradpaare einzeln gelagert bzw. angetrieben werden. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal bezieht sich auf die seitliche Verschiebbarkeit der einzelnen Laufräder zur Kranbahn, wobei zwischen beweglichen Lagern und Festlagern unterschieden wird. Für Festlager wird unterstellt, dass die auftretenden horizontalen Kräfte durch Reibung übertragbar sind, unabhängig vom Vorhandensein von Führungselementen. Die Radführung erfolgt entweder durch Spurkränze auf beiden Seiten oder durch (horizontale) Führungsrollen. Der Einsatz von Führungsrollen verursacht einen wesentlich geringeren Verschleiß an Schienen und Laufrädern und wird deshalb bei hoch beanspruchten Kranbahnen bevorzugt. Antriebsart und Radführung haben großen Einfluss auf die Übertragung horizontaler Kräfte der Räder auf die Kranbahnträger/Kranschienen und sind ein wichtiger Faktor bei deren Bemessung.

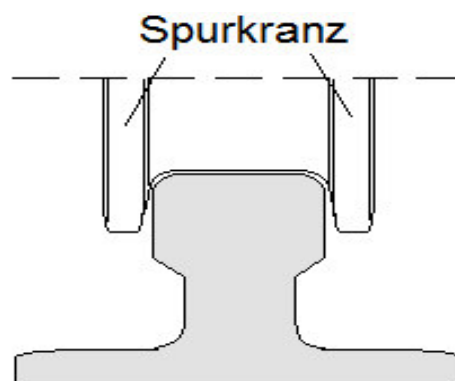


Abb. 2-7: Laufrad mit Spurkranz, eigene Zeichnung nach [11]; S. 382, Bild 2.6a

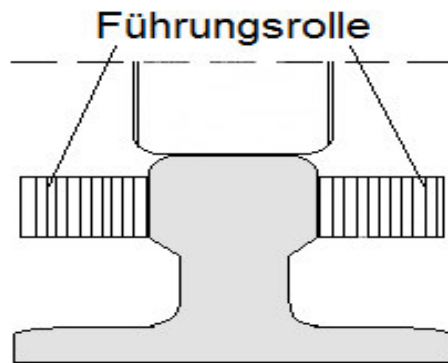


Abb. 2-8: Laufrad mit Führungsrollen, eigene Zeichnung nach [11]; S. 382, Bild 2.6b

	Gekoppelt (C)	Unabhängig (I)
Fest/Fest (F/F)	<p>CFF</p>	<p>IFF</p>
Fest/Lose (F/M)	<p>CFM</p>	<p>IFM</p>

Tabelle 2-1: Antriebssysteme nach [8]; S. 21, Bild 9

2.4 Kranschienen

2.4.1 Allgemeines

Kranschienen unterliegen aufgrund der verschiedenen horizontalen und vertikalen dynamischen Belastungen einem unterschiedlich starkem Verschleiß. Die Auswahl einer geeigneten Schiene, sei es in Form einer Flachstahlschiene oder der sogenannten Form A bzw. Form F, ist von diversen Einflüssen und Kriterien, beispielsweise der Werkstoffe von Schiene und Laufrad, der Größe der Radkräfte, Art und Dauer der Krannutzung, u.a. abhängig.

2.4.2 Flachstahlschienen

Flach- oder Vierkantstahlschienen (oft mit abgerundeten/abgeschrägten Ecken) werden üblicherweise mit Querschnitten $b_r \times h_r$ (50mm-70mm x 30mm-50mm) bei Krananlagen mit geringen Beanspruchungen und Radlasten (Klassifizierung S0 bis S3) eingesetzt, da bei diesen ein geringer Verschleiß auftritt. Verwendet werden normalerweise die Stahlgüten S235 und S355. Üblich ist die Befestigung der Flachstahlschienen auf den Obergurten des Kranbahnträgers mit durchgehenden Schweißnähten, zwar sind für niedrige Beanspruchungsklassen ebenfalls unterbrochene Nähte möglich, allerdings besteht dabei eine erhöhte Korrosionsgefahr, sowie eine erhöhte Kerbwirkung. Vorteilhaft an der geschweißten Ausführung ist nicht allein, dass die Schiene, unter Berücksichtigung von 25 % Abnutzung, zum tragenden Querschnitt gezählt werden darf und dadurch die Querschnittswerte des Kranbahnträgers positiv beeinflusst, sondern auch die geringen Materialkosten. Nachteile dieser Variante sind allerdings der hohe Arbeits- und Kostenaufwand im Falle von Reparaturen bzw. Austausch der Schiene.

2.4.3 Schienen der Form A/F

Vor allem bei Krananlagen die hohen Beanspruchungen ausgesetzt sind, tritt ein entsprechend hoher Verschleiß auf, deshalb sollten die betroffenen Bauteile austauschbar sein. Für Kranschienen der Form A/F wird deshalb ein verschleißfester Stahl mit hohen Zugfestigkeiten ($>690 \text{ N/mm}^2$) verwendet, diese werden allgemein mit speziellen Klemmen am Obergurt befestigt, wodurch eine leichte Montage und schnelles Austauschen ermöglicht wird. Die Spezialklemmen werden beidseitig im Abstand von 500 mm bis 750 mm angebracht und können an den Kranbahnträger geschraubt oder geschweißt werden.

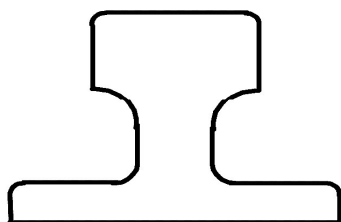


Abb. 2-9: Schiene Form A [7];
S. 18; Bild 5.1

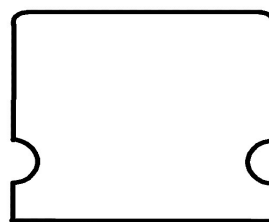


Abb. 2-10: Schiene Form F [7];
S. 18; Bild 5.1

2.4.4 Schienenunterlagen

Als moderne, dem Stand der Technik entsprechende, Schienenunterlagen werden bei aufgeklemmten Schienen der Form A nachgiebige Elastomerunterlagen mit einer Mindestdicke von 6 mm verwendet, deren Einsatz die Laufruhe des Krans erhöht und somit zu geringeren Stoßbelastungen und dadurch zu verminderten Schallemissionen und auch zu geringerem Verschleiß führt. Sie bewirken zudem durch bessere Lastverteilung eine geringere Beanspruchung im Kranbahnträgerobergurt, wodurch allerdings die Biegebeanspruchung in dessen Querrichtung erhöht wird. Durch Stahleinlagen in der Mitte der Elastomerunterlage kann eine konzentrierte Einleitung der vertikalen Lasten in den Bereich des Trägerstegs erreicht werden, wodurch zusätzliche Maßnahmen zur Stützung des Obergurtes entfallen können.

2.4.5 Schienenstöße

Eine Ursache für Verschleiß und Beschädigungen am Kran bzw. dessen Antrieb können Querlücken in Schienenstößen sein. Man unterscheidet zwischen offenen und verschweißten Ausführungen. Offene Stöße sind als Stumpfstoß sehr leicht zu fertigen, führen aber zu starken Stoßbelastungen und erhöhtem Verschleiß und sind deshalb ausschließlich für sehr leichten Betrieb zu sinnvoll einsetzbar. Starke Stoßwirkungen wie bei einem Stumpfstoß, lassen sich durch eine Ausführung als Stufenstoß, oder noch vorteilhafter als Schrägstoß, vermindern. Bei (aufgeschweißten) Flachstahlschienen wird für Schienenstöße im Bereich eines Kranbahnträgerstoßes ein um ca. 0,5 m versetzt angeordneter, unverbundener Schienenstoß ausgebildet, dieser muss aber gegen seitliche Verschiebung gesichert werden. Zur Vermeidung von Zwängungsspannungen werden die am Stoß überragenden Schienenenden nicht auf dem nächsten Kranbahnträger verschweißt. Auch bei geklemmten Profilschienen ist, bei Ausführung eines offenen versetzten Stoßes, durch Positionierung der Klemmen sehr nah an der Stoßfuge, die Verschieblichkeit des freien Schienenendes zu verhindern. Schienen der Form A bzw. F (besonders für schweren Kranbetrieb) werden zur Minimierung von Stößeinwirkungen üblicherweise voll durchgeschweißt bzw. in möglichst großen Längen bezogen und durchlaufend über die gesamte Länge des Kranbahnträgers verlegt.

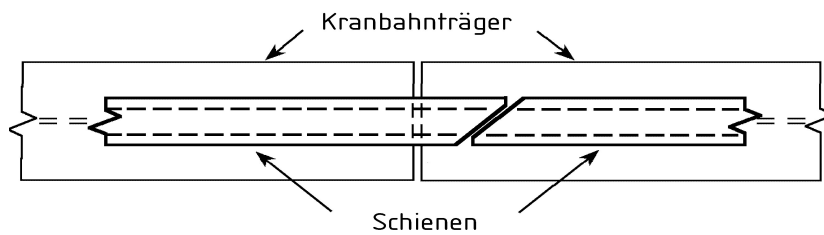


Abb. 2-11: Draufsicht Schienenschrägstoß [7]; S. 39, Bild 8.3

2.4.6 Montagetoleranzen

Um den Verschleiß gering zu halten und einen problemlosen Kranbetrieb sicherzustellen, müssen Montagetoleranzen für Kranschienen eingehalten werden. Die Spannweite s zwischen den Achsen der Kranschienen sollte maximal um Δs vom Sollwert abweichen:

$$\text{wenn } s < 16 \text{ m: } \Delta s = \pm 5 \text{ mm} \quad (2.1)$$

$$\text{wenn } s > 16 \text{ m: } \Delta s = \pm [5 + 0,25 \cdot (s - 16)] \text{ mm} \quad (2.2)$$

3 Berechnungsgrundlagen für Kranbahnträger

3.1 Sicherheits- und Nachweiskonzept nach Eurocode

In den Eurocodenormen wird, wie bereits in der DIN 18800, ein semiprobabilistisches Nachweisverfahren verwendet, d.h. es wird mit Teilsicherheitsbeiwerten gearbeitet, um Streuungen der Einwirkungen und Widerstände zu berücksichtigen. Für Einwirkungen, Festigkeiten und andere Einflussgrößen wurden charakteristische Werte festgelegt, die mit festen Teilsicherheitsbeiwerten verknüpft werden. Ist der so ermittelte Bemessungswert für E_d kleiner als der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit R_d , ist der Tragsicherheitsnachweis erfüllt. Im Gebrauchstauglichkeitsnachweis wird anstelle von R_d der Ausdruck C_d verwendet.

Allgemein ist nachzuweisen, dass:

$$E_d < R_d \quad (3.1)$$

3.2 Materialien

3.2.1 Grundsätzliches

Zum Einsatz dürfen die Stahlsorten nach DIN EN 1993-1-1 kommen, somit besteht die Möglichkeit auch höherfeste Stähle (siehe Tabelle 3-1) einzusetzen.

3.2.2 Bruchzähigkeit

Um ein Sprödbbruchversagen zu vermeiden, muss eine ausreichende Bruchzähigkeit des Werkstoffs vorhanden sein. Bei der Werkstoffauswahl ist die niedrigste zu erwartende Temperatur über die gesamte Nutzungsdauer zu berücksichtigen.

sichtigen. Für Kranbahnen die nur innerhalb von Gebäuden zum Einsatz kommen, darf 0 °C als minimale Temperatur angenommen werden. Sind die Anforderungen nach DIN EN 1993-1-10 für die niedrigste Temperatur erfüllt, ist kein weiterer Nachweis gegen Spröbruchversagen notwendig.

Stahlsorte	Erzeugnisdicke $t \leq 40$ mm		Erzeugnisdicke $40 < t \leq 80$ mm	
	f_y in N/mm ²	f_u in N/mm ²	f_y in N/mm ²	f_u in N/mm ²
S 235	235	360	215	360
S 355	355	490	335	410
S 450	440	550	410	550
S 275 N/NL	275	390	255	370
...
S 460 N/NL	460	540	430	540
S 275 M/ML	275	370	255	360
...
S 460 M/ML	460	540	430	530
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550
S 235 H	235	360	215	340
...
S 460 NH/NLH	460	560	430	550

Tabelle 3-1: Nennwerte der Streckgrenze f_y und der Zugfestigkeit f_u für warmgewalzten Baustahl nach [4]; S. 28; Tabelle 3.1

3.3 Einwirkungen

3.3.1 Allgemeines

3.3.1.1 Definition der Einwirkungen

Infolge des Hebens und Beförderns von Gütern erfolgt eine Übertragung der Belastung über den Kran und dessen Laufwerk in die Kranschiene, den Kran-

bahnträger und schließlich in die entsprechenden lastabtragenden Bauteile. Auf den Kranbahnträger wirken nicht nur die vertikalen Beanspruchungen wie Hublast und Eigengewicht, sondern neben horizontalen Kräften aus Anfahren und Bremsen von Kran und Kranbrücke, sind des weiteren die im Betrieb auftretenden Schwingungen zu berücksichtigen, welche eine zusätzliche Erhöhung der Beanspruchungen, infolge zweiachsiger Biegung und Torsion, verursachen. Neben den ständigen Einwirkungen infolge des Eigengewichtes der Kranbahn und ihrer Bauteile, wirken veränderliche und außergewöhnliche Einwirkungen auf den Kranbahnträger (Abb. 3-1).

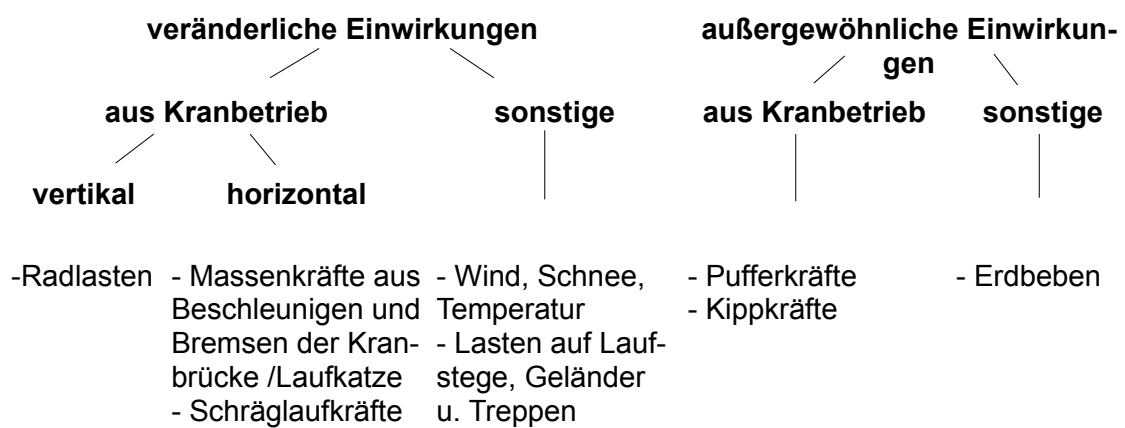


Abb. 3-1: Einwirkungen auf Kranbahnträger nach [11]; S. 390, Bild 3.1

3.3.1.2 Dynamische Vergrößerungsfaktoren

Zur Berücksichtigung der auftretenden Schwingungen während des Betriebes, werden verschiedene dynamische Vergrößerungsfaktoren (siehe Tabelle 3-2) sogenannte Schwingbeiwerte, auf die ermittelten statischen Einwirkungen angewendet.

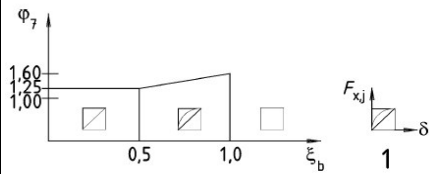
3.3.1.3 Hubklassen

Nach DIN EN 1991-3:2006, Anhang B werden Krane, aus praktischen Erfahrungen, entsprechend ihrem Verwendungszweck, dem Einfluss des Hubvorgangs und den erwarteten Spannungskollektiven in Hubklassen (HC 1 bis HC 4) und Beanspruchungsklassen (S 0 bis S 9) eingeteilt (Tabelle 3-3).

	Berücksichtigter Einfluss	Anzuwenden auf	Werte für dynamische Faktoren
φ_1	- Schwingungsanregung des Krantragwerks infolge Anheben der Hublast vom Boden	Eigengewicht des Krans	$0,9 < \varphi_1 < 1,1$ Die beiden Werte 0,9 und 1,1 decken die unteren und die oberen Werte des Schwingungsimpulses ab.
φ_2	- dynamische Wirkungen beim Anheben der Hublast vom Boden	Hublast	$\varphi_2 = \varphi_{2,\min} + \beta_2 \cdot v_h$ v_h - konstante Hubgeschwindigkeit [m/s]
			Hubklasse
			β_2
			$\varphi_{2,\min}$
			HC1 0,17 1,05 HC2 0,34 1,10 HC3 0,51 1,15 HC4 0,68 1,20
φ_3	- dynamische Wirkungen durch plötzliches Loslassen der Nutzlast, wenn zum Beispiel Greifer oder Magneten benutzt werden	Hublast	$\varphi_3 = 1 - \Delta m/m \cdot (1 + \beta_3)$ mit Δm der losgelassene oder abgesetzte Teil der Masse der Hublast m die Masse der gesamten Hublast $\beta_3 = 0,5$ bei Kranen mit Greifern oder ähnlichen Vorrichtungen für langsames Absetzen $\beta_3 = 1,0$ bei Kranen mit Magneten oder ähnlichen Vorrichtungen für schnelles Absetzen
φ_4	- dynamische Wirkung hervorgerufen durch Fahren auf Schienen oder Fahrbahnen	Eigengewicht des Krans und Hublast	$\beta_4 = 1,0$ vorausgesetzt, dass die in EN 1090-2 für Kranschienen festgelegten ergänzenden Toleranzen der Klasse 1 eingehalten werden
φ_5	- dynamische Wirkungen verursacht durch Antriebskräfte	Antriebskräfte	$\varphi_5 = 1,0$ für Fliehkräfte $1,0 \leq \varphi_5 \leq 1,5$ für Systeme mit stetiger Veränderung der Kräfte $1,5 \leq \varphi_5 \leq 2,0$ bei plötzlichen Veränderungen der Kräfte $\varphi_5 = 3,0$ bei Antrieben mit beträchtlichem Spiel
φ_6	- dynamische Wirkung infolge einer Prüflast	Prüflast	$\varphi_6 = 1,0$ für statische Prüflast $\varphi_6 = 0,5 (1 + \varphi_2)$ für dynamische Prüflast

Tabelle 3-2: Definition der dynamischen Vergrößerungsfaktoren nach [11]; S. 391, Tabelle 3.4

Tabelle 3-2: Fortsetzung

φ_7	- dynamische elastische Wirkungen verursacht durch Pufferanprall	Pufferkräfte	$\varphi_7 = 1,25$	$0 \leq \xi_b \leq 0,5$
			$\varphi_7 = 1,25 + 0,7(\xi_b - 0,5)$	$0,5 \leq \xi_b \leq 1,0$
			ξ_b ist von der Pufferkennlinie abhängig 	

Zeile	Art des Krans	Hubklasse	S-Klasse
1	Handbetriebene Krane	HC 1	S0, S1
2	Montagekrane	HC 1, HC 2	S0, S1
...
6	Werkstattkrane	HC 2, HC 3	S3, S4
7	Brückenlaufkrane, Anschlagkrane - mit Greifer- oder Magnetarbeitsweise	HC 3, HC 4	S6, S7
...

Tabelle 3-3: Empfehlung für Hubklassen und Beanspruchungsklassen nach [3]; S. 46, Tabelle

B.3

3.3.1.4 Lastgruppen

Gleichzeitig auftretende Kranlastanteile können als Lastgruppen zusammengefasst berücksichtigt werden, wobei jede Lastgruppe eine einzige Kraneinwirkung darstellt (siehe Tabellen 3-4 und 3-5). Als Voraussetzung wird dabei nur eine zu berücksichtigende horizontale Einwirkung pro Kran angenommen. Sollen weitere kranunabhängige Einwirkungen betrachtet werden gelten die Bestimmungen aus DIN EN 1991-3:2006, Anhang A.

		Sym- bol	Lastgruppen									
			Grenzzustand der Tragfähigkeit							Prüf- last	A ²⁾	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Eigengewicht des Krans	Q_c	φ_1	φ_1	1	φ_4	φ_4	φ_4	1	φ_1	1	1
2	Hublast	Q_h	φ_2	φ_3	-	φ_4	φ_4	φ_4	$\eta^{1)}$	-	1	1
3	Beschleunigung/Bremsen der Kranbrücke	H_L, H_T	φ_5	φ_5	φ_5	φ_5	-	-	-	φ_5	-	-
4	Schräglauf der Kranbrücke	H_S	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
5	Beschleunigen oder Bremsen der Laufkatze oder des Hubwerks	H_{T3}	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
6	Wind in Betrieb	F^*_W	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-
7	Prüflast	Q_T	-	-	-	-	-	-	-	φ_6	-	-
8	Pufferkraft	H_B	-	-	-	-	-	-	-	-	φ_7	-
9	Kippkraft	H_{TA}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
¹⁾ η ist der Anteil der Hublast, der nach entfernen der Nutzlast verbleibt, jedoch nicht im Eigengewicht des Krans enthalten ist.												
²⁾ Außergewöhnliche Bemessungssituation												

Tabelle 3-4: Lastgruppen und dynamische Vergrößerungsfaktoren im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach [10]; S. 260; Tab. 11-3

		Sym- bol	Lastgruppen			
			Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit			Ermüdung
			11 ^{*)}	12 ^{**)}	13 ^{**)}	14
1	Eigengewicht des Krans	Q_c	1	1	1	$\varphi_{fat,1}$
2	Hublast	Q_h	1	1	1	$\varphi_{fat,2}$
3	Beschleunigung/Bremsen der Kranbrücke	H_L, H_T	-	-	1	-
4	Schräglauf der Kranbrücke	H_S	-	1	-	-
5	Wind in Betrieb	F^*_W	-	1	1	-
^{*)} zur Bestimmung der vertikalen Verformung ^{**) zur Bestimmung der horizontalen Verformung}						

Tabelle 3-5: Lastgruppen und dynamische Vergrößerungsfaktoren im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und für den Ermüdungsnachweis nach [10]; S. 260; Tab11-3

3.3.2 Ständige Einwirkungen

Allgemein werden nur die Bauteileigengewichte als ständige Einwirkungen auf Kranbahnen angesehen.

3.3.3 Veränderliche vertikale Einwirkungen

3.3.3.1 Radlasten

Unter Berücksichtigung der jeweils kritischen Lastanordnung sind die für die Bemessung notwendigen minimalen und maximalen Radlasten zu ermitteln. Die Formel zur Berechnung der maximalen Radlasten ist in DIN EN 1991-3 nicht enthalten, war gemäß [11] aber in DIN 1055-10 noch angegeben.

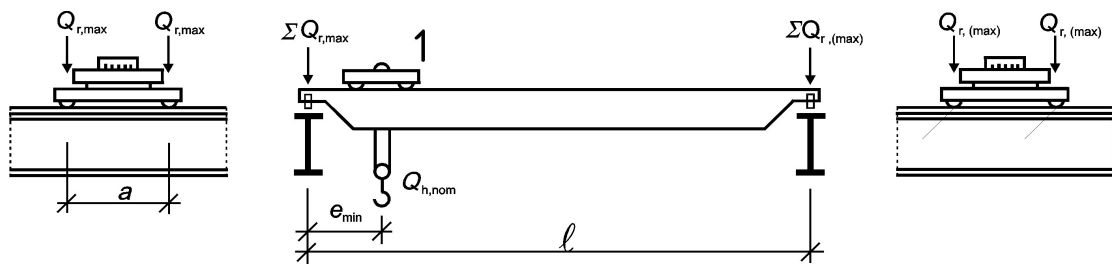


Abb. 3-2a: Lastanordnung des belasteten Krans zur Bestimmung der maximalen Belastung des Kranbahnträgers [3]; S. 18, Bild 2.1

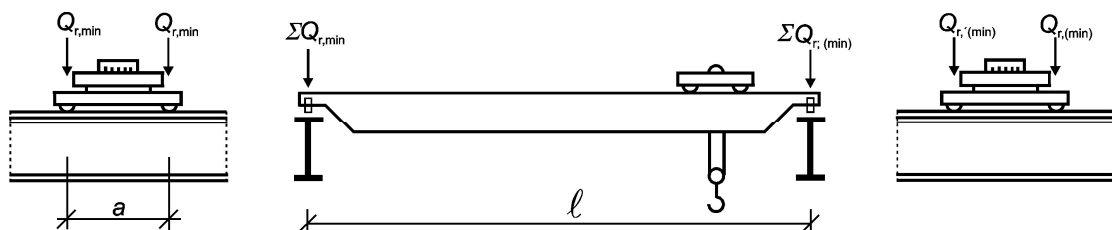


Abb. 3-2b: Lastanordnung des unbelasteten Krans zur Bestimmung der minimalen Belastung des Kranbahnträgers [3]; S. 18, Bild 2.1

Dabei ist

- $Q_{r,max}$ die maximale Last je Rad des belasteten Krans;
- $Q_{r,(max)}$ die zugehörige Last je Rad des belasteten Krans;
- $\Sigma Q_{r,max}$ die Summe der maximalen Radlasten $Q_{r,max}$ des belasteten Krans

	je Kranbahn;
$\sum Q_{r,(max)}$	die Summe der zugehörigen Radlasten $Q_{r,(max)}$ des belasteten Krans je Kranbahn;
$Q_{r,min}$	die minimale Last je Rad des unbelasteten Krans;
$Q_{r,(min)}$	die zugehörige Last je Rad auf dem mehrbelasteten Kranbahn-träger;
$\sum Q_{r,min}$	die Summe der minimalen Radlasten $Q_{r,min}$ des unbelasteten Krans je Kranbahn;
$\sum Q_{r,(min)}$	die Summe der zugehörigen Radlasten $Q_{r,(min)}$ des unbelasteten Krans je Kranbahn;
$Q_{h,nom}$	die Nennhublast.

Legende:

1 Laufkatze

Die Berechnung der maßgebenden Radlasten erfolgt nach [11]; S. 392, Gleichung (3.2) bis (3.5) wie folgt für:

a) belastete Krananlage

$$\sum Q_{r,max} = \varphi_i \cdot \left[\frac{Q_{CI}}{2} + Q_{C2} \cdot \left(\frac{l - e_{min}}{l} \right) \right] + \varphi_j \cdot Q_H \cdot \left(\frac{l - e_{min}}{l} \right) \quad (3.2)$$

$$\sum Q_{r,(max)} = \varphi_i \cdot \left[\frac{Q_{CI}}{2} + Q_{C2} \cdot \frac{e_{min}}{l} \right] + \varphi_j \cdot Q_H \cdot \frac{e_{min}}{l} \quad (3.3)$$

b) unbelastete Krananlage

$$\sum Q_{r,min} = \varphi_i \cdot \left[\frac{Q_{CI}}{2} + Q_{C2} \cdot \frac{e_{min}}{l} \right] \quad (3.4)$$

$$\sum Q_{r,(min)} = \varphi_i \cdot \left[\frac{Q_{CI}}{2} + Q_{C2} \cdot \left(\frac{l - e_{min}}{l} \right) \right] \quad (3.5)$$

Das Gesamtgewicht von Kran und Hublast $\sum Q_r$ kann aus der Summe der Radlasten wie folgt ermittelt werden:

$$\sum Q_r = \sum Q_{r,max} + \sum Q_{r,(max)} \quad (3.6)$$

Dabei sind

- $\varphi_{i,j}$ dynamische Vergrößerungsfaktoren;
- e_{min} minimaler Abstand zwischen Kranbahnträgermitte und Laufkatze;
- l Kranbrückenspannweite;
- Q_{C1} Eigengewicht der Krankonstruktion ohne Laufkatze;
- Q_{C2} Eigengewicht der Laufkatze.

3.3.3.2 Exzentrizität der Radlast

Die Exzentrizität e der Radlast Q_r sollte wie folgt angenommen werden (siehe auch 4.3.2.1 und 4.4.1.3):

$$e = 0,25 b_r \quad (3.7)$$

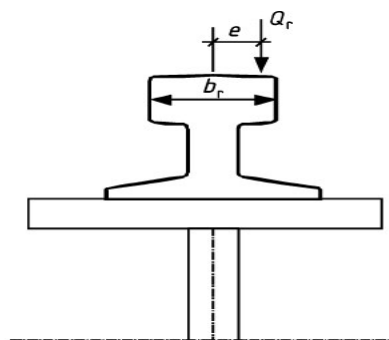


Abb. 3-3: Exzentrizität der Radlast [3]; S. 19,
Bild 2.2

Die Exzentrizität der Radlast ist nur im Ermüdungsnachweis für Beanspruchungsklassen ab S 4 zu berücksichtigen.

3.3.4 Veränderliche horizontale Einwirkungen

3.3.4.1 Allgemeines

Horizontale Lasten können in Längs- und Querrichtung auf Kranbahnträger wir-

ken. Es sind Horizontalkräfte zu berücksichtigen, die hervorgerufen werden durch das Beschleunigen und Bremsen der Kranbrücke bzw. Laufkatze, Führungskräfte resultierend aus Schräglauf der Kranbrücke und gegebenenfalls Pufferkräfte infolge von Anprall der Laufkatze oder Kranbrücke.

3.3.4.2 Antriebskräfte

Die Antriebskraft K wird vom Kranhersteller angegeben und sollte so gewählt werden, dass ein Durchrutschen bzw. Durchdrehen der Räder verhindert wird, da es sonst zu einem erhöhten Verschleiß an Rädern und Schienen kommt. Entsprechend muss das Antriebsmoment kleiner sein, als der zwischen Rad und Schiene herrschende Reibschluss. Für die unterschiedlichen Antriebsarten, siehe Abschnitt 2.3, lässt sich die Antriebskraft K nach DIN EN 1991-3 wie folgt ermitteln:

$$K = K_1 + K_2 = \mu \Sigma Q_{r,min}^* \quad (3.8)$$

$$\text{- bei Einzelradantrieb:} \quad \Sigma Q_{r,min}^* = m_W Q_{r,min} \quad (3.9)$$

$$\text{- bei Zentralantrieb:} \quad \Sigma Q_{r,min}^* = Q_{r,min} + Q_{r,(min)} \quad (3.10)$$

Dabei ist

μ der Reibungsbeiwert;

$\mu = 0,2$ für Stahl auf Stahl;

m_W Anzahl der einzeln angetriebenen Räder

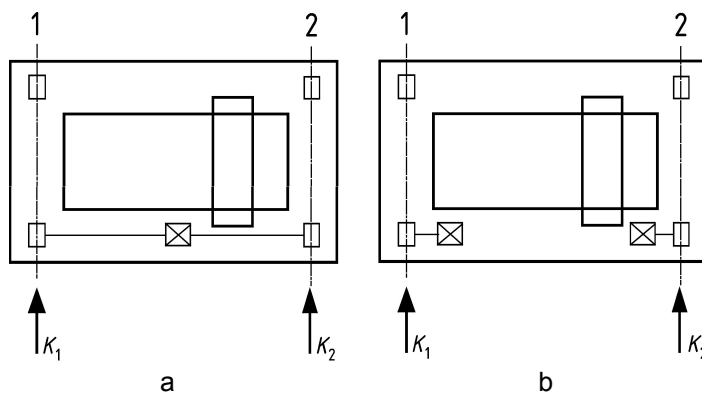


Abb. 3-4: Antriebskräfte a) Einzelradantrieb, b) Zentralantrieb [3]; S. 26, Bild 2.7

3.3.4.3 Horizontale Kräfte infolge Beschleunigen und Bremsen der Kranbrücke

Resultierend aus der Antriebskraft K wirkt entlang der Kranbahnträger eine Kraft $H_{L,i}$, verursacht durch das Beschleunigen und Bremsen des Krans (Abb. 3-5). Nach DIN EN 1991-3 kann diese wie folgt berechnet werden:

$$H_{L,i} = \varphi_5 \frac{K}{n_r} \quad (3.11)$$

Dabei ist

- n_r Anzahl der Kranbahnträger;
- K die Antriebskraft (nach 3.3.4.2);
- φ_5 dynamischer Faktor (siehe Tabelle 3-6).

Zahlenwerte für φ_5	Anzuwenden auf
$\varphi_5 = 1,0$	Fliehkräfte
$1,0 \leq \varphi_5 \leq 1,5$	Systeme mit stetiger Veränderung der Kräfte
$1,5 \leq \varphi_5 \leq 2,0$	plötzlich auftretende Veränderung der Kräfte
$\varphi_5 = 3,0$	bei Antrieben mit beträchtlichem Spiel

Tabelle 3-6: Werte für φ_5 [3]; S. 25, Tabelle 2.6

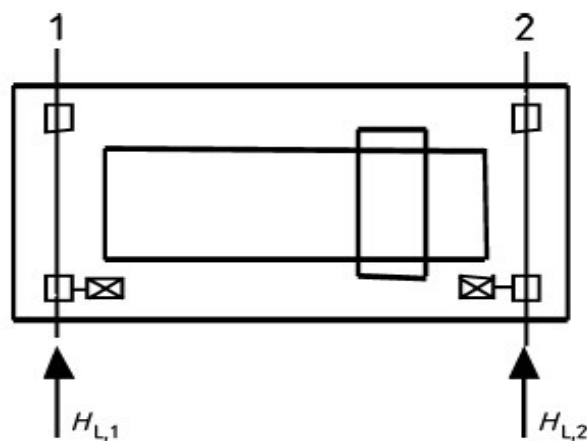


Abb. 3-5: Horizontale Kräfte längs zur Fahrbahn [3]; S. 24, Bild 2.5

Die aus K_1 und K_2 resultierende Antriebskraft K wirkt, da Einzelradantriebe normalerweise gleich dimensioniert werden, in der Mitte der Kranbrückenspann-

weite. Bei außermittiger Katzstellung fällt diese Antriebskraft jedoch nicht mit dem Massenschwerpunkt S zusammen. Der Abstand l_s zwischen dem Massenschwerpunkt und der Antriebskraft K ist bei maximal einseitiger Katzstellung am größten. Das maßgebende Moment M entsteht durch Antriebskräfte unter Berücksichtigung eines voll belasteten Krans, mit dem maximalen Abstand l_s und kann nach DIN EN 1991-3 wie folgt ermittelt werden:

$$M = K \cdot l_s \quad (3.12)$$

$$l_s = (\xi_1 - 0,5) \cdot l \quad (3.13)$$

$$\xi_1 = \frac{\Sigma Q_{r, max}}{\Sigma Q_r} \quad (3.14)$$

$$\Sigma Q_r = \Sigma Q_{r, max} + \Sigma Q_{r, (max)} \quad (3.15)$$

$$\xi_2 = 1 - \xi_1 \quad (3.16)$$

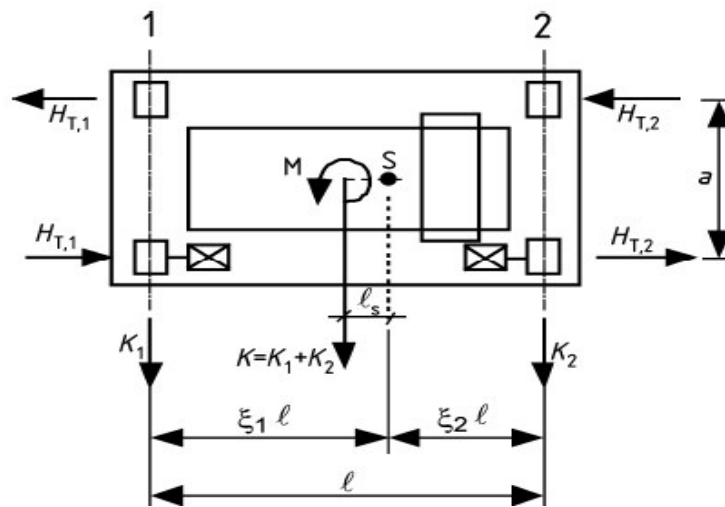


Abb. 3-6: Horizontale Kräfte infolge Beschleunigen und Bremsen [3]; S. 25, Bild 2.6

Wird das, infolge Beschleunigung oder Bremsen der Kranbahnanlage, entstehende Moment M in ein Kräftepaar $H_{T,i}$ aufgeteilt, wirken diese Kräfte quer auf beide Kranbahnen gemäß Abb. 3-6. Unter der Bedingung, dass beide Laufradpaare Festlager sind, dürfen die horizontalen Kräfte proportional zu ξ_1 und ξ_2 wie folgt ermittelt werden:

$$H_{T,1} = \varphi_5 \cdot \xi_2 \cdot \frac{M}{a} \quad (3.17)$$

$$H_{T,2} = \varphi_5 \cdot \xi_1 \cdot \frac{M}{a} \quad (3.18)$$

mit

a Abstand der Spurkränze bzw. Führungsrollen;

l Spannweite der Kranbrücke.

3.3.4.4 Horizontale Kräfte infolge Schräglauf

Da die Fahrt von Kranbahnanlagen nie als eine ideale, absolut gerade Bewegung in Richtung der Längsachse der Kranbahn stattfindet, wirken aufgrund des Schräglaufs und der Spurführung horizontale, quer zur Fahrbahn gerichtete Kräfte. Die sogenannte Führungskraft S und deren Reaktionskräfte $H_{S,i,j,k}$, die in Abhängigkeit vom Schräglaufwinkel α berechnet werden können. Der komplizierte Zusammenhang der tatsächlichen Vorgänge wurde durch einige Vereinfachungen überschaubar gemacht. Zum einen wird eine stationäre Bewegung auf einer perfekten Fahrbahn unterstellt, bei der nur ein statischer Gleichgewichtszustand betrachtet wird. Weiterhin wird der Krananlage eine Starrkörperbewegung mit hinterer Freilaufstellung unterstellt, d.h. nur das in Fahrtrichtung vorderste Radführungsmittel überträgt die Führungskraft S , wodurch eine Drehung der Kranbrücke hervorgerufen wird. Der Führungskraft S stehen Reaktionskräfte $H_{S,i,j,k}$ an den anderen Rädern, abhängig von Antrieb und Radführung, gegenüber, die wie folgt ermittelt werden können:

$$S = f \cdot \lambda_{S,j} \cdot \Sigma Q_r \quad (3.19)$$

$$H_{S,1,j,L} = f \cdot \lambda_{S,1,j,L} \cdot \Sigma Q_r \quad (j \text{ ist die Nr. der angetriebenen Achse}) \quad (3.20)$$

$$H_{S,2,j,L} = f \cdot \lambda_{S,2,j,L} \cdot \Sigma Q_r \quad (j \text{ ist die Nr. der angetriebenen Achse}) \quad (3.21)$$

$$H_{S,1,j,T} = f \cdot \lambda_{S,1,j,T} \cdot \Sigma Q_r \quad (3.22)$$

$$H_{S,2,j,T} = f \cdot \lambda_{S,2,j,T} \cdot \Sigma Q_r \quad (3.23)$$

Dabei ist

$\lambda_{S,2,j,k}$ der Kraftbeiwert nach Tabelle 3-8;

i Schienenachse i ;

j Radpaarachse j ;

k Richtung der Kraft (L = längs, T = quer);
 f der Kraftschlussbeiwert (mit α nach Tabelle 3-7);

$$f = 0,3 \cdot (1 - e^{(-250\alpha)}) \leq 0,3 \quad (3.24)$$

Dabei ist

α der Schräglaufwinkel

Der Schräglaufwinkel α sollte maximal 0,015 rad betragen und kann wie folgt berechnet werden:

$$\alpha = \alpha_F + \alpha_V + \alpha_0 \leq 0,015 \quad (3.25)$$

mit α_F , α_V und α_0 nach Tabelle 3-7

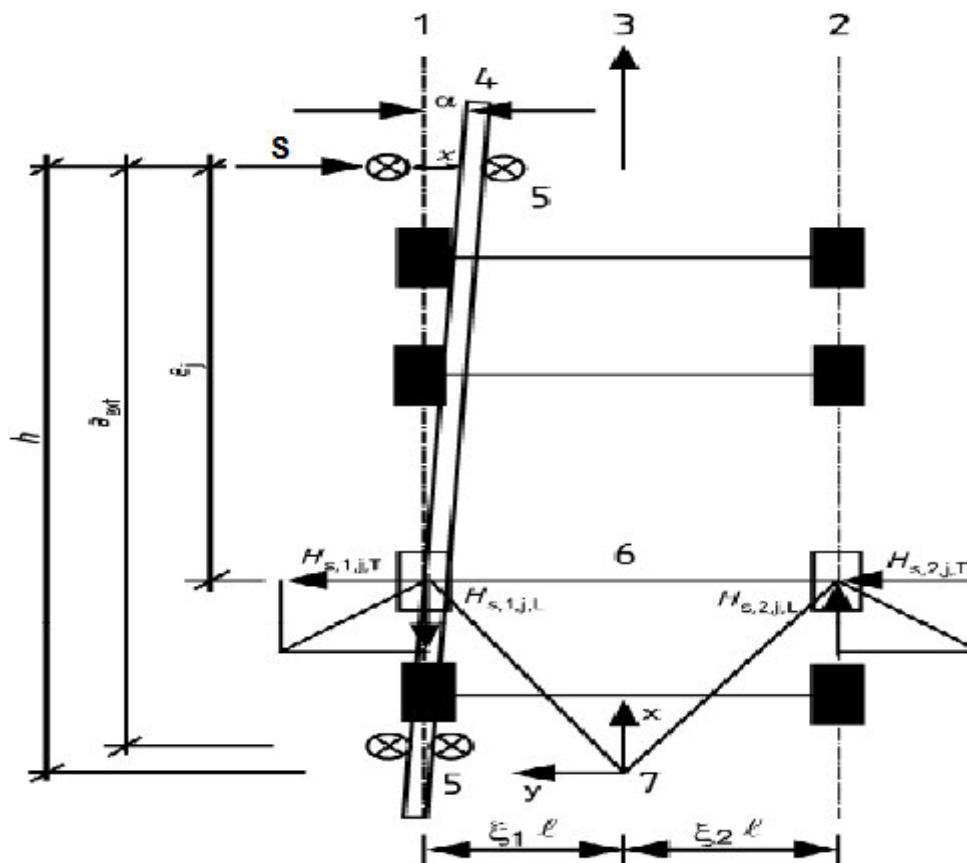


Abb. 3-7: Definition des Winkels α und des Abstandes h nach [3]; S. 29, Bild 2.8

Legende

- | | | | |
|---|----------------------|---|---------------------------|
| 1 | Schiene $i = 1$ | 5 | vorderstes Führungsmittel |
| 2 | Schiene $i = 2$ | 6 | Radpaar j |
| 3 | Bewegungsrichtung | 7 | momentaner Gleitpol |
| 4 | Richtung der Schiene | | |

Winkel α_i	Mindestwerte von α_i
$\alpha_F = \frac{0,75x}{a_{ext}}$	0,75x \geq 5 mm bei Führungsrollen 0,75x \geq 10 mm bei Spurkränzen
$\alpha_V = \frac{y}{a_{ext}}$	y \geq 0,03 b in mm bei Führungsrollen y \geq 0,10 b in mm bei Spurkränzen
α_0	$\alpha_0 = 0,001$
Dabei ist a_{ext} der Abstand der äußeren Führungsrollen bzw. Spurkränze an der Schiene b Schienenkopfbreite x Freiraum zwischen Schiene und Führungsmittel y die Abnutzung der Schiene und Führungsmittel α_0 die Toleranz für Rad und Schienenrichtung	

Tabelle 3-7: Bestimmung des Schräglaufwinkels α [3]; S. 28, Tabelle 2.7

Gleitpolabstand h und Kraftbeiwerte $\lambda_{S,ij,k}$	System			
	CFF	IFF	CFM	IFM
h	$\frac{m \xi_1 \xi_2 l^2 + \sum e_j^2}{\sum e_j}$		$\frac{m \xi_1 l^2 + \sum e_j^2}{\sum e_j}$	
$\lambda_{S,j}$	$1 - \frac{\sum e_j}{n \cdot h}$		$\xi_2 \cdot \left(1 - \frac{\sum e_j}{n \cdot h}\right)$	
$\lambda_{S,1j,L}$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \cdot \frac{l}{h}$	0	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \cdot \frac{l}{h}$	0
$\lambda_{S,1j,T}$	$\frac{\xi_2}{n} \cdot \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$			
$\lambda_{S,2j,L}$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \cdot \frac{l}{h}$	0	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \cdot \frac{l}{h}$	0
$\lambda_{S,2j,T}$	$\frac{\xi_1}{n} \cdot \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$		0	0

Dabei ist

n

die Anzahl der Radpaare

h

der Abstand zwischen dem momentanen Gleitpol und dem relevanten Führungsmittel

m

die Anzahl der gekoppelten Radpaare ($m = 0$ für unabhängige Radpaare)

l

die Spannweite des Krans

e_j

der Abstand zwischen den Radpaaren j und dem relevanten Führungsmittel

$\xi_1 \cdot l$

der Abstand zwischen dem momentanen Gleitpol und der Kranbahn 1

$\xi_2 \cdot l$

der Abstand zwischen dem momentanen Gleitpol und der Kranbahn 2

Tabelle 3-8: Bestimmung von $\lambda_{S,ij,k}$ -Werten und Gleitpolabstand h nach [11]; S. 398, Tabelle 3.7

3.3.4.5 Horizontale Kräfte infolge Beschleunigen und Bremsen der Laufkatze

Verursacht durch die Katzfahrt entstehen horizontale Kräfte, die quer zum Kranbahnträger wirken. Auf diese Kräfte soll hier nicht näher eingegangen werden. Da sie nicht maßgebend sind, darf angenommen werden, dass sie durch die Pufferkräfte infolge Anprall der Laufkatze (siehe Abschnitt 3.3.5.2) abgedeckt sind.

3.3.5 Außergewöhnliche Einwirkungen

3.3.5.1 Pufferkräfte infolge Anprall des Krans

Diese Kräfte treten beim Anprall der Kranbrücke an die Endanschläge oder Prellböcke (Puffer) auf. Für die Dimensionierung der Kranbahnträger sind sie nicht von Bedeutung, weshalb an dieser Stelle keine nähere Betrachtung erfolgen soll. Zur Ermittlung der Pufferkraft $H_{B,1}$ siehe DIN EN 1991-3, Abschnitt 2.11.1.

3.3.5.2 Pufferkräfte infolge Anprall der Laufkatze

Die durch Anprall der Laufkatze entstehende horizontale Pufferkraft $H_{B,2}$ darf, bei freischwingender Nutzlast, nach DIN EN 1991-3 mit 10% der Summe aus Hublast und Eigengewicht der Laufkatze angesetzt werden.

$$H_{B,2} = (Q_{C2} + Q_H) \cdot 0,1 \quad (3.26)$$

mit

Q_{C2}	Eigengewicht der Laufkatze
Q_H	Nennhublast

3.3.5.3 Kippkräfte

Besteht die Möglichkeit, dass ein sich mit einer Hublast bewogender Kran, durch einen Zusammenstoß des Lastaufnahmemittels bzw. der Last mit einem Hindernis kippen kann, sind die auftretenden statischen Kräfte zu berücksichtigen.

3.3.6 Weitere Einwirkungen

Auf die folgenden Einwirkungen soll nicht weiter eingegangen werden, zu weiteren Informationen sei auf DIN EN 1991-3 und den entsprechend genannten Abschnitt verwiesen.

- Temperatureinwirkungen, Abschnitt 2.8
- Lasten auf Laufstegen, Treppen, Podesten und Geländern, Abschnitt 2.9
- Prüflasten, Abschnitt 2.10
- Einwirkungen aus Wind bzw. Schnee, Anhang A

3.3.7 Einwirkungen aus weiteren Kranen

Zusammenarbeitende Krane müssen wie ein Kran behandelt werden. Bei mehreren unabhängig arbeitenden Kranen kann die, als gleichzeitig wirkende, maximale zu berücksichtigenden Anzahl der Krane nach DIN EN 1991-3 Ber 1:2013-8, 5) Berichtigung zu 2.5.3 angenommen werden.

3.4 Einwirkungskombinationen

3.4.1 Allgemeines

Aus den Beanspruchungen infolge der zuvor betrachteten Einwirkungen sind gemäß den geltenden Kombinationsregeln die Bemessungswerte E_d zu ermitteln. Die verschiedenen Bemessungssituationen mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten (γ -Faktoren) und Kombinationsbeiwerten ψ sind in DIN EN 1990

geregelt. Ergänzend dazu sind in DIN EN 1991-3, Anhang A weitere Regelungen zu finden.

3.4.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Für jeden kritischen Lastfall sind die Bemessungswerte E_d unter Berücksichtigung der Bemessungswerte unabhängiger Einwirkungen zu ermitteln. Es wird hier nur der Grenzzustand der Tragfähigkeit für Querschnitte, Bauteile und Verbindungen (STR) betrachtet. Weitere Angaben zu Grenzzuständen sind in DIN EN 1990, Abschnitt 6.4 zu finden.

Beim Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit (STR) ist zu zeigen, dass:

$$E_d \leq R_d \quad (3.27)$$

Dabei ist

E_d der Bemessungswert der Auswirkungen der Einwirkungen;

R_d der Bemessungswert der zugehörigen Tragfähigkeit.

Kombinationen für Einwirkungen bei ständigen oder vorübergehenden Bemessungssituationen werden nach DIN EN 1990 wie folgt gebildet:

- allgemeine Kombination

$$E_d = \gamma_{sd} E \{ \gamma_{g,j} G_{k,j} ; \gamma_P P ; \gamma_{q,1} Q_{k,1} ; \gamma_{q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1 ; i \geq 1 \quad (3.28)$$

Kombinationen für Einwirkungen bei außergewöhnlichen Bemessungssituationen gilt:

$$E_d = E \{ G_{k,j} ; P ; A_d ; (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1}) Q_{k,1} ; \psi_{2,1} Q_{k,1} \} \quad j \geq 1 ; i \geq 1 \quad (3.29)$$

Aus dem Bemessungswert der dominierenden veränderlichen Einwirkung (Leiteinwirkung) und den Bemessungswerten der Kombinationswerte der begleitenden veränderlichen Einwirkungen (Begleiteinwirkungen) können die Kombinationen der Auswirkungen mit Hilfe der Tabellen 3-8 bis 3-10 ermittelt werden:

Bemessungssituation	ständige Einwirkungen		Leiteinwirkung	Begleiteinwirkungen	
	ungünstig	günstig		vorherrschend (gegebenenfalls)	weitere
ständig und vorübergehend	$\gamma_{G,sup} G_{k,sup}$	$\gamma_{G,inf} G_{k,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$	-	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
außergewöhnlich	$G_{k,sup}$	$G_{k,inf}$	A_d	$\psi_{1,1}$ oder $\psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,1} Q_{k,i}$

Tabelle 3-9: Bemessungswerte der Einwirkungen nach [2]; S. 68, Tabelle A2.4(B)

Einwirkung	Symbol	Situation	
		P/T	A
Ständige Kraneinwirkung			
- ungünstig	$\gamma_{G,sup}$	1,35	1,00
- günstig	$\gamma_{G,inf}$	1,00	1,00
Veränderliche Kraneinwirkung			
- ungünstig	$\gamma_{Q,sup}$	1,35	1,00
- günstig	$\gamma_{Q,inf}$		
Kran vorhanden		1,00	1,00
Kran nicht vorhanden		0,00	0,00
Andere veränderliche Einwirkungen	γ_Q		
- ungünstig		1,50	1,00
- günstig		0,00	0,00
Außergewöhnliche Einwirkungen	γ_A	-	1,00
P - ständige Bemessungssituation T - vorübergehende Bemessungssituation A - außergewöhnliche Bemessungssituation			

Tabelle 3-10: Empfohlene Werte für γ -Faktoren [3]; S. 44, Tabelle A.1

Einwirkung	Symbol	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Einzelkran oder Lastgruppe aus Kranen	Q_r	1,0	0,9	a
a	Verhältnis zwischen den ständig vorhandenen Kraneinwirkungen und den gesamten Kraneinwirkungen			

Tabelle 3-11: ψ -Faktoren für Kranlasten [3]; S. 45, Tabelle A.2

Weitere Kombinationsbeiwerte sind EN 1990, Tabelle A.1.1 zu entnehmen.

3.4.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Für jeden kritischen Lastfall sind die Bemessungswerte E_d unter Berücksichtigung der Bemessungswerte unabhängiger Einwirkungen zu ermitteln, dabei

werden im allgemeinen alle Teilsicherheitsbeiwerte zu $\gamma_{F,ser} = \gamma_{M,ser} = 1,0$ angenommen.

Beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ist für die folgenden Kombinationen zu zeigen, dass:

$$E_d \leq C_d \quad (3.30)$$

Dabei ist

E_d der Bemessungswert der Auswirkungen der Einwirkungen in der Dimension des Gebrauchstauglichkeitskriteriums aufgrund der maßgebenden Einwirkungskombination;

C_d der Bemessungswert der Grenze für das maßgebende Gebrauchstauglichkeitskriterium.

- charakteristische Kombination:

$$E_d = E \{ G_{k,j} ; P ; Q_{k,1} ; \psi_{0,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1 ; i \geq 1 \quad (3.31)$$

- häufige Kombination:

$$E_d = E \{ G_{k,j} ; P ; \psi_{1,1} Q_{k,1} ; \psi_{2,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1 ; i \geq 1 \quad (3.32)$$

- quasi-ständig:

$$E_d = E \{ G_{k,j} ; P ; \psi_{2,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1 ; i \geq 1 \quad (3.33)$$

Kombination	ständige Einwirkungen G_d		veränderliche Einwirkungen Q_d	
	ungünstig	günstig	ungünstig	günstig
charakteristisch	$G_{k,sup}$	$G_{k,inf}$	$Q_{k,1}$	$\psi_{0,i} Q_{k,i}$
häufig	$G_{k,sup}$	$G_{k,inf}$	$\psi_{1,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$
quasi-ständig	$G_{k,sup}$	$G_{k,inf}$	$\psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$

Tabelle 3-12: Bemessungswerte der Einwirkungen nach [2]; S. 71, Tabelle A2.6

4 Tragwerksberechnung

4.1 Berechnungsmethoden

4.1.1 Allgemeines

Schnittgrößen dürfen entweder nach der Methode der elastischen oder der plastischen Tragwerksberechnung ermittelt werden. Für Kranbahnen bei denen ein Ermüdungsnachweis zu führen ist wird die elastische Tragwerksberechnung empfohlen, dabei geht man von linearen Spannungs- Dehnungsbeziehungen des Materials aus. Auch wenn Schnittgrößen mit elastischen Berechnungsverfahren ermittelt wurden, dürfen plastische Querschnittsbeanspruchbarkeiten angesetzt werden. Deren Verwendung wirkt sich auf die Nachweise günstig aus, da durch die höheren plastischen Beanspruchbarkeiten eine geringere Auslastung auftritt.

4.2 Schnittgrößenberechnung

4.2.1 Allgemeines

Bei der Bemessung von Kranbahnträgern sind verschiedene Schnittgrößen zu berücksichtigen. Unter anderem zweiachsige Biegung infolge der vertikalen Einwirkungen und der horizontalen Seitenlasten. Zusätzlich entstehen Torsionsmomente durch eine exzentrische Radlasteinleitung und außerhalb des Schubmittelpunktes angreifende Seitenlasten. Zudem kommt es zu lokalen Spannungen durch die konzentrierte Radlasteinleitung. Weitere Schnittgrößen sind vertikale und horizontale Querkräfte, sowie einachsiger Druck oder Zug durch längs gerichtete horizontale Einwirkungen. Für die Bemessung sind die letztgenannten Schnittgrößen meist nicht maßgebend.

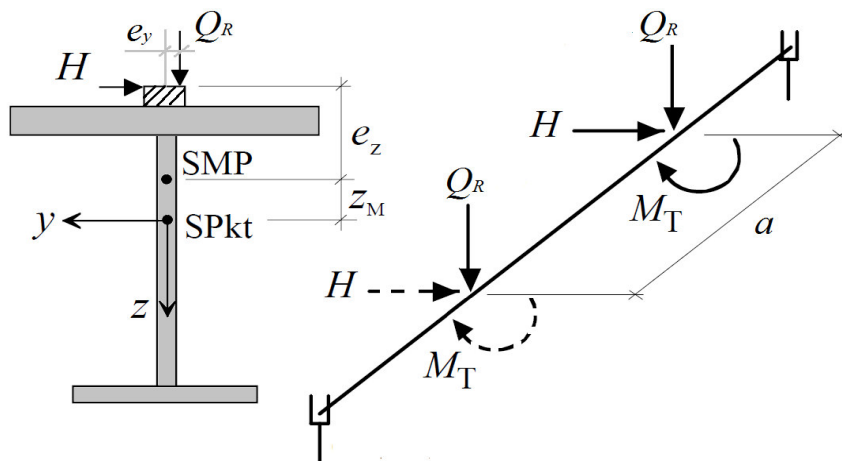


Abb. 4-1: Einwirkungen auf Kranbahnträger, eigene Zeichnung nach [12]; S. 8.92

4.2.2 Statisches System - Einfeldträger mit zwei gleichgroßen Einzellasten

Es soll hier nur das statische System des Berechnungsbeispiels (Kapitel 7), ein Einfeldträger mit aufgesetztem Brückenlaufkran mit zwei gleichgroßen Radlasten, betrachtet werden.

4.2.2.1 Maximalmoment um die y-y Achse

Wird ein Kranbahnträger von einem Kran mit zwei Rädern befahren, tritt die maximale Belastung durch Biegemomente oft nicht in der Trägerrmitte auf, sondern bei der sogenannten Culmannschen Laststellung. Der Einfluss des Kranbahnträgereigengewichtes auf die Lage des Maximalmomentes bleibt im Allgemeinen unberücksichtigt.

Abb. 4-1 zeigt die anzunehmende Laststellung für das Maximale Biegemoment M_y für einen Einfeldträger mit zwei gleichgroßen Radlasten es gilt $F = F_1 = F_2$.

Für mehrere Einzellasten, unterschiedlich große Einzellasten oder Zwei- und Mehrfeldträger sind die entsprechenden Angaben in verschiedenen Tabellenwerken zu finden.

Bei gleichgroßen Radlasten mit einem Abstand $a < 0,586 l$ ergibt sich das maxi-

male Moment (ohne Eigengewichtanteil) nach [11]; S. 405, Tabelle 3.15. zu:

$$M_y = \frac{F \cdot l}{8} \cdot \left(2 - \frac{a}{l}\right)^2 \quad (4.1)$$

bei der Lastposition x :

$$x = \frac{l}{2} - \frac{a}{4} \quad (4.2)$$

Ist der Abstand der Radlasten $a > 0,586 l$ wird die Laststellung mit einer Einzel-
last F in Trägermitte maßgebend, mit:

$$M_y = \frac{F \cdot l}{4} \quad (4.3)$$

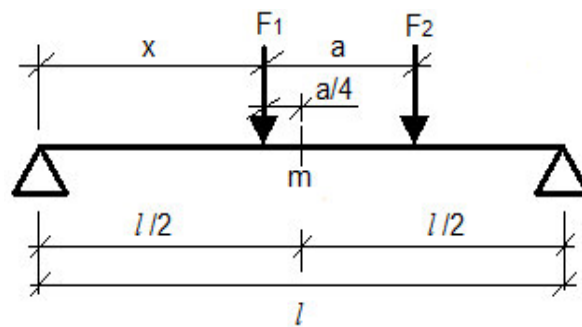


Abb. 4-2: Culmannsche Laststellung, eigene
Zeichnung

4.2.2.2 Maximalmoment um die z-z Achse

Unter Verwendung der maximalen Horizontalkraft H (anstelle von F) kann das
maximale Biegemoment M_z gemäß Gleichung (4.1) bzw. (4.3) berechnet wer-
den.

4.2.2.3 Querkraft

Die maximale Querkraft V_z (ohne Eigengewichtanteil) tritt auf, wenn eine Rad-
last direkt über einem Auflager steht. Es gilt:

$$V_z = F + F \cdot \left(\frac{l-a}{l} \right) \quad (4.4)$$

Im Punkt x berechnet man die zugehörige Querkraft nach Abb. 4-2 infolge der Culmannschen Laststellung wie folgt:

$$V_z = \frac{F_1 \cdot (l-x)}{l} + \frac{F_2 \cdot (l-x-a)}{l} \quad (4.5)$$

4.3 Querschnittsnachweise

4.3.1 Querschnittsklassen

In den Eurocodenormen findet eine Einteilung in vier Querschnittsklassen statt, dies dient einer Einschätzung der Begrenzung der Beanspruchbarkeit und des Rotationsvermögens durch lokales Beulen von Querschnittsteilen. Die Definition der verschiedenen Querschnittsklassen ist in DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 5.5 geregelt. Die Einteilung eines Querschnitts findet zum einen anhand des Spannungsverlaufs statt, dabei ist es im Allgemeinen ausreichend eine auf der sicheren Seite liegende Voreinschätzung zu treffen, da exakte Aussagen meist erst nach der Bemessung möglich sind. Ausschlaggebend für die Klassifizierung eines Querschnitts ist das c/t -Verhältnis des Querschnittsteils (Flansch oder Steg), der den größten Druckspannungen ausgesetzt ist.

Für die elastische Tragwerksberechnung eignen sich alle Querschnitte der Querschnittsklassen 1 bis 3, mit der elastischen Grenztragfähigkeit (unter Verwendung der wirksamen Querschnittswerte auch Querschnitte der Klassen 4). Für die Klassen 1 und 2 dürfen plastische Querschnittswerte angesetzt werden.

Folgende Spannungsnachweise sind möglich:

a) Normalspannungen
$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.6)$$

mit $\sigma_{x,Ed}$ aus Biegung und Normalkraft.

b) Schubspannungen
$$\tau_{Ed} \leq \frac{f_y}{(\sqrt{3} \gamma_{M0})} \quad (4.7)$$

Allerdings erfolgt die Nachweisführung für die Querschnittstragfähigkeit im Eurocode meist über Schnittgrößen. Dazu eignet sich für eine Berechnung eines Kranbahnträgers von Hand der überschlägige Nachweis mittels Tragwirkungssplitting siehe 4.3.2.1.

4.3.2 Äußere Schnittgrößen

4.3.2.1 vereinfachte Annahmen - Tragwirkungssplitting

Nach DIN EN 1993-6 darf für die Abtragung von Kranlasten (außer bei Kasten-trägern) eine Aufteilung und direkte Zuordnung auf verschiedene Querschnittsteile erfolgen. Demnach werden vertikale Radlasten durch den belasteten Kranbahnträger aufgenommen, Seitenlasten können dem Obergurt des Kranbahnträgers (oder einem Seitenträger) zugeordnet werden. Torsionsmomente dürfen in ein horizontales Kräftepaar aufgeteilt und den Ober- und Unterflanschen zugewiesen werden.

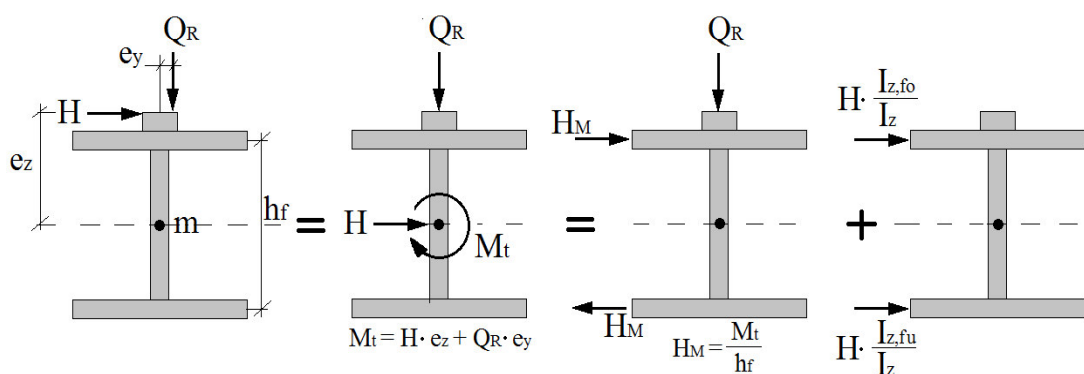


Abb. 4-3: Tragwirkungssplitting, eigene Zeichnung nach [11]; S. 422, Bild 4.8

Die maximalen Horizontalkräfte für den Ober- und Untergurt ergeben sich nach [11]; S. 423, Gleichung (4.9) und (4.10) wie folgt:

Obergurt:

$$H_{fo} = H_M + H \cdot \frac{I_{z,fo}}{I_z} = \frac{M_t}{h_f} + H \cdot \frac{I_{z,fo}}{I_z} = \frac{H \cdot e_z + Q_R \cdot e_y}{h_f} + H \cdot \frac{I_{z,fo}}{I_z} \quad (4.8)$$

Untergurt:

$$H_{fu} = -H_M + H \cdot \frac{I_{z,fu}}{I_z} = -\frac{M_t}{h_f} + H \cdot \frac{I_{z,fu}}{I_z} = -\frac{H \cdot e_z + Q_R \cdot e_y}{h_f} + H \cdot \frac{I_{z,fu}}{I_z} \quad (4.9)$$

mit

$I_{z,fo}$ Trägheitsmoment des Obergurtes um die z-Achse;

$I_{z,fu}$ Trägheitsmoment des Untergurtes um die z-Achse;

I_z Trägheitsmoment des Gesamtquerschnitts um die z-Achse;

h_f Höhe zwischen den Schwerpunkten von Ober- und Untergurt.

4.3.3 Beanspruchbarkeit von Querschnitten im Grenzzustand der Tragfähigkeit

4.3.3.1 Allgemeines

In keinem Querschnitt bzw. Querschnittsteil dürfen die (kombinierten) Bemessungswerte der Beanspruchungen, den von der Querschnittsklasse abhängigen, Bemessungswert der Beanspruchbarkeit überschreiten. Für einen kritischen nachzuweisenden Punkt eines Querschnitts darf nach der (empfohlenen) Elastizitätstheorie gemäß [4] folgendes (konservatives) Kriterium angewendet werden:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1 \quad (4.10)$$

Dabei ist

$\sigma_{x,Ed}$ der Bemessungswert der Normalspannung in Längsrichtung am betrachteten Punkt;

$\sigma_{z,Ed}$ der Bemessungswert der Normalspannung in Querrichtung am betrach-

teten Punkt;

τ_{Ed} der Bemessungswert der Schubspannung am betrachteten Punkt.

Gleichung 4.11 entspricht dem Vergleichsspannungsnachweis nach DIN 18800:

$$\sigma_{v,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{z,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{z,Ed} + 3\tau_{Ed}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.11)$$

Für Querschnitte der Klassen 1 bis 3 die durch N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ und $M_{z,Ed}$ beansprucht werden, darf, wenn $V_{Ed} < 0,5V_{pl,Rd}$, die folgende Näherung angenommen werden:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (4.12)$$

Dabei sind N_{Rd} , $M_{y,Rd}$ und $M_{z,Rd}$ die Bemessungswerte der Tragfähigkeiten in Abhängigkeit von der Querschnittsklasse.

Weitere Angaben zur Beanspruchbarkeit von Querschnitten sind in DIN EN 1993-1-1, 6.2 gegeben.

Beanspruchbarkeit von Bauteilen und Querschnitten	
Querschnittsbeanspruchbarkeit (unabhängig von der Querschnittsklasse)	γ_{M0} 1,00
Bauteilwiderstand bei Stabilitätsversagen (bei Anwendung von Bauteilnachweisen)	γ_{M1} 1,10
Querschnittswiderstand bei Bruchversagen infolge Zugbeanspruchung	γ_{M2} 1,25

Tabelle 4-1: Teilsicherheitsbeiwerte für Beanspruchbarkeiten von Bauteilen und Querschnitten nach [4]; S. 48f

4.3.3.2 Querkraftbeanspruchung

Der Bemessungswert der elastischen Querkraftbeanspruchbarkeit (für Querschnitte der Klassen 1 bis 3) darf, falls nicht ein Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 5 maßgebend wird, nach folgender Grenzbedingung angenommen werden:

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \gamma_{M0})} \leq 1,0 \quad (4.13)$$

τ_{Ed} kann wie folgt ermittelt werden:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot t} \quad (4.14)$$

Dabei ist

- V_{Ed} der Bemessungswert der Querkraft (nach 4.2.3.3);
 S das statische Flächenmoment;
 I das Flächenträgheitsmoment des Gesamtquerschnitts;
 t die Blechdicke am Nachweispunkt.

Im Steg von I- oder H-Querschnitten kann die Schubspannung auf folgende Weise ermittelt werden:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_w} \quad \text{falls} \quad \frac{A_f}{A_w} \geq 0,6 \quad (4.15)$$

Dabei ist

- A_f die Fläche eines Flansches;
 A_w die Fläche des Steges ($A_w = h_w t_w$).

Soll die plastische Querkraftbeanspruchbarkeit (für Querschnittsklasse 1 und 2) berücksichtigt werden, ist nachzuweisen:

$$V_{Ed} \leq V_{pl, Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (4.16)$$

Für unausgesteifte Stegbleche ist zusätzlich ein Schubbeulnachweis nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 5 zu führen, wenn:

$$h_w / t_w > 72 \varepsilon / \eta \quad (4.17)$$

mit
$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y (N/mm^2)}} \quad (4.18)$$

und

- $\eta = 1,2$ bis S460
 $\eta = 1,0$ ab S460

4.3.3.3 Biegebeanspruchung

Der Querschnittsnachweis für Biegebeanspruchung kann mittels Tragwirkungssplitting durchgeführt werden, um den aufwendigeren Nachweis unter Berücksichtigung von Torsionsmomenten zu umgehen. Dabei wird das Biegemoment $M_{y,Ed}$ dem Gesamtquerschnitt zugeordnet, während die Biegung um die z-z Achse dem Obergurt zugewiesen wird. Zur Berechnung von $M_{z,Ed}$ wird die maximale Horizontalkraft H_{fo} nach Gleichung (4.8) in Gleichung (4.1) bzw. (4.3) eingesetzt. Der Nachweis lautet wie folgt:

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{fo,pl,z,Rd}} \right) \leq 1 \quad (4.19)$$

Dabei ist

$M_{fo,pl,z,Rd}$ der Bemessungswert der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit des Obergurtes um die z-z Achse.

Gleichung (4.19) gilt für Querschnitte der Klassen 1 und 2, soll ein Querschnitt der Klasse 3 untersucht werden, sind die elastischen Momentenbeanspruchbarkeiten $M_{el,y,Rd}$ und $M_{fo,el,z,Rd}$ einzusetzen. Oder der Nachweis erfolgt auf Spannungsebene.

4.3.3.4 Beanspruchung aus Biegung und Querkraft

Bei kombinierter Beanspruchung aus Biegung und Querkraft sollte der Einfluss der Querkraft auf die Momentenbeanspruchbarkeit berücksichtigt werden, außer wenn der Bemessungswert der Querkraft die Hälfte des Bemessungswertes der plastischen Querkraftbeanspruchbarkeit nicht überschreitet. Dies gilt allerdings nur, wenn keine Reduktion der Querschnittstragfähigkeit durch Schubbeulen zu beachten ist. Anderenfalls findet eine Abminderung des Bemessungswertes der Momententragfähigkeit statt, indem eine wie folgt abgeminderte Streckgrenze der betroffenen Querschnittsteile angesetzt wird:

$$(1-\rho) f_y \quad (4.20)$$

$$\text{wobei } \rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (4.21)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_v / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (4.22)$$

Dabei ist

A_v die wirksame Schubfläche.

Die wirksame Schubfläche A_v kann nach EN 1993-1-1, 6.2.6 wie folgt ermittelt werden:

a) für gewalzte Profile mit I- und H-Querschnitten, Lastrichtung parallel zum Steg:

$$A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f \quad (4.23)$$

aber mindestens $\eta h_w t_w$

b) für geschweißte Profile mit I-, H- und Kastenquerschnitten, Lastrichtung parallel zum Steg:

$$\eta \Sigma(h_w t_w) \quad (4.24)$$

c) für geschweißte Profile mit I-, H- und Kastenquerschnitten, Lastrichtung parallel zum Flansch:

$$A - \Sigma(h_w t_w) \quad (4.25)$$

Dabei ist

A	die Querschnittsfläche;	t_w	Stegdicke;
b	die Gesamtbreite;	r	der Ausrundungsradius;
h_w	die Stegblechhöhe;	t_f	die Flanschdicke;
η	1,2 bis S460; 1,0 ab S460.		

4.4 Lokale Nachweise

4.4.1 Radlasteinleitung

Die Lasteinleitung der Radlasten über die Kranschienen in den Obergurt des

Kranbahnträgers erfolgt sehr konzentriert, dies führt zu signifikanten lokalen Spannungen aufgrund zusätzlicher Beanspruchungen.

4.4.1.1 Lokale vertikale Druckspannungen

Die lokale vertikale Druckspannung $\sigma_{oz,Ed}$ im Steg infolge Radlasten auf dem Oberflansch lässt sich für I-Profile ohne Ausrundungsradius r wie folgt berechnen:

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{l_{eff} t_w} \quad (4.26)$$

Dabei ist

- $F_{z,Ed}$ der Bemessungswert der Radlasteinleitung;
- l_{eff} die effektive Lastausbreitungslänge ($(l_{eff} + 2r)$ für Walzprofile);
- t_w die Dicke des Stegblechs.

Die effektive Lastausbreitungslänge l_{eff} an der Unterseite des Obergurtes (entspricht dem kritischen Punkt für I-Profile ohne Ausrundungsradius r) kann nach DIN EN 1993-6 gemäß Tabelle 4-2 ermittelt werden.

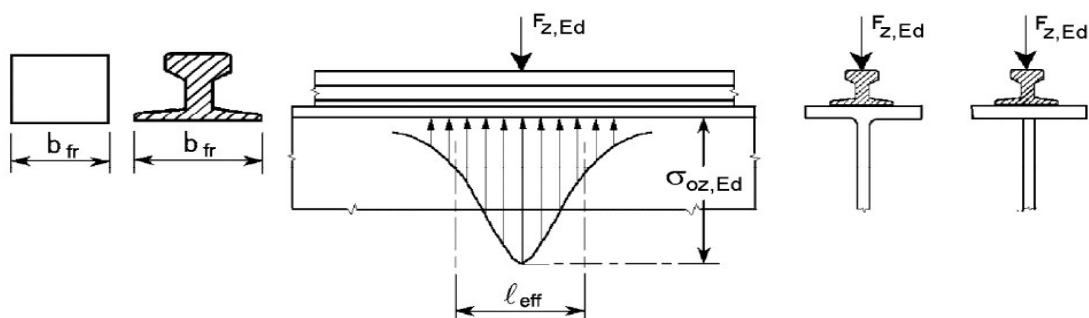


Abb. 4-4: Definition der effektiven Lastausbreitungslänge l_{eff} [6]; S. 19, Bild 5.2

Bei der Ermittlung von vertikalen Druckspannungen in horizontalen Schnitten darf gemäß Abb. 4-5 ein Lastausbreitungswinkel von 45° angenommen werden.

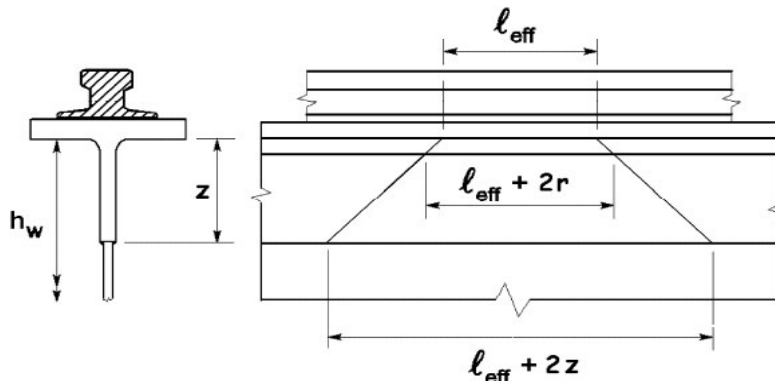


Abb.4-5: Ermittlung l_{eff} unter einem Lastausbreitungswinkel von 45° [6];
S. 20, Bild 5.3

Fall	Beschreibung	Effektive Lastausbreitungslänge l_{eff}
(a)	Kranschiene schubstarr am Flansch befestigt	$l_{eff} = 3,25 [I_{rf}/t_w]^{1/3}$
(b)	Kranschiene nicht schubstarr am Flansch befestigt	$l_{eff} = 3,25 [(I_r + I_{f,eff})/t_w]^{1/3}$
(c)	Kranschiene auf einer mind. 6 mm dicken nachgiebigen Elastomerunterlage	$l_{eff} = 4,25 [(I_r + I_{f,eff})/t_w]^{1/3}$
$I_{f,eff}$	Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des Flansches mit der effektiven Breite b_{eff}	
I_r	Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie der Schiene	
I_{rf}	Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des zusammengesetzten Querschnitts einschließlich der Schiene und des Flansches mit der effektiven Breite b_{eff}	
t_w	Stegdicke	
$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f$ aber $b_{eff} \leq b$		
Dabei ist		
b	die Gesamtbreite des Gurt	
b_{fr}	die Breite des Schienenfußes	
h_r	die Schienenhöhe	
t_f	die Flanschdicke	

Tabelle 4-2: Ermittlung der effektiven Lastausbreitungslänge l_{eff} [6]; S. 20, Tabelle 5.1

4.4.1.2 Lokale Schubspannungen

Infolge der Radlast entstehen globale Schubspannungen direkt unterhalb der Radlast und zusätzliche lokale Schubspannungen $\tau_{oxz,Ed}$ auf beiden Seiten der

Radlast (Abb. 4-6). Die zusätzliche lokale Schubspannung sollte zusammen mit den globalen Schubspannungen berücksichtigt werden. Bei horizontalen Schnitten im Steg unterhalb $z = 0,2 h_w$ kann sie jedoch vernachlässigt werden.

Die lokalen Schubspannungen dürfen mit 20% der maximalen lokalen vertikalen Spannungen $\sigma_{oz,Ed}$ angenommen werden:

$$\tau_{oxz,Ed} = 0,2 \sigma_{oz,Ed} \quad (4.27)$$

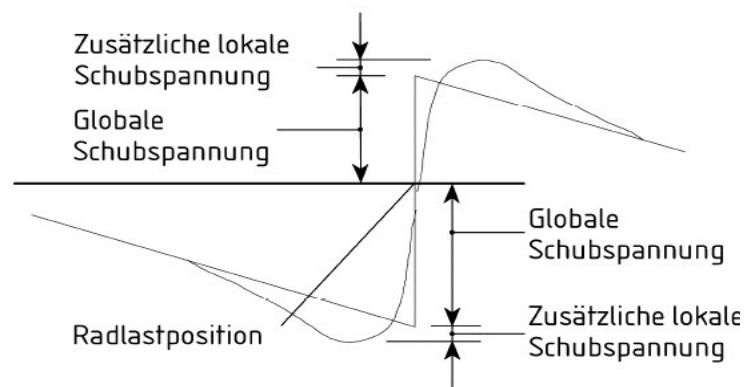


Abb. 4-6: globale und lokale Schubspannungen [6]; S. 21, Bild 5.4

4.4.1.3 Lokale Biegespannungen im Steg infolge exzentrischer Radlasten

Aufgrund der exzentrischen Radlasteinleitung wirkt ein Torsionsmoment T_{Ed} die daraus resultierenden Biegespannungen $\sigma_{T,Ed}$ dürfen bei Stegblechen mit Quersteifen auf folgende Art ermittelt werden:

$$\sigma_{T,Ed} = \frac{6 T_{Ed}}{a t_w^2} \eta \tanh(\eta) \quad (4.28)$$

$$\text{mit: } \eta = \left[\frac{0,75 a t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\pi h_w / a)}{\sinh(2 \pi h_w / a) - 2 \pi h_w / a} \right]^{0,5} \quad (4.29)$$

Dabei ist

a der Abstand der Quersteifen im Steg;

h_w die Gesamthöhe des Steges (lichter Abstand zwischen den Flanschen);
 I_t das Torsionsträgheitsmoment des Flansches (einschließlich der Schiene, falls sie schubstarr befestigt ist).

Für die Ermittlung des Torsionsmoments T_{Ed} gilt:

$$T_{Ed} = F_{z,Ed} \cdot e_y \quad (4.30)$$

mit: $e_y = 0,25 b_r$ mit $e_y \geq 0,5 t_w$ (4.31)

Bei Nachweisen der Grenzzustände der Tragfähigkeit muss $\sigma_{T,Ed}$ nicht berücksichtigt werden. Bei Ermüdungsnachweisen sollten, für Beanspruchungsklassen ab S 4, die Biegespannungen angesetzt werden.

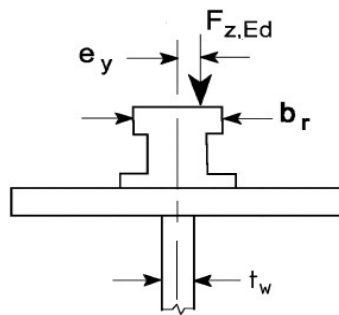


Abb. 4-7: Exzentrizität der Radlast[6];
S. 22, Bild 5.5

Nach [10]; S. 270 ist ein kritischer Punkt für die Vergleichsspannung aus lokalen und globalen Spannungen der obere Stegstrand direkt am Auflager, in der Laststellung die dort zur maximalen Querkraft führt (siehe 4.2.3.3). An dieser Stelle wirken die Zugspannung $\sigma_{x,Ed}$ und Schubspannung τ_{Ed} aus globaler Tragwirkung und die lokale vertikale Druckspannung $\sigma_{oz,Ed}$ und die lokale Schubspannung $\tau_{oxz,Ed}$. Nach [10]; Gleichung (12-9) erhält man folgenden Nachweis:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{oz,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\sigma_{oz,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed} + \tau_{oxz,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1 \quad (4.32)$$

4.5 Stabilitätsnachweise von Bauteilen

4.5.1 Biegedrillknicken

Die infolge von exzentrisch angreifenden horizontalen und vertikalen Einwirkungen auftretenden Torsionsmomente sind beim Biegedrillknicknachweis für Kranbahnträger zu berücksichtigen, aus diesem Grund kann das Verfahren nach DIN EN 1993-1-1, 6.3 nicht angewendet werden. Alternativ sind folgende Verfahren möglich:

Ersatzstabverfahren nach DIN EN 1993-6, 6.3.2.3, bei einem als Einfeldträger gelagerten Kranbahnträger, darf der Biegedrillknicknachweis als Nachweis gegen Biegeknicken eines Druckstabes (mit Druckgurt und 1/5 des Steges) geführt werden.

Ersatzstabverfahren Alternativer Nachweis nach DIN EN 1993-6, Anhang A für ein einfeldrigen Kranbahnträger unter Berücksichtigung des Wölbmomentes.

Biegedrillknicknachweis als Schnittgrößennachweis nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung von Ersatzimperfektionen und der Wölbkrafttorsion.

Hier soll nur das Ersatzstabverfahren mit Nachweis gegen Biegeknicken des Obergurtes als Druckstab (um die z-z Achse) angewendet werden, da der Rechenaufwand für eine Rechnung von Hand geeignet ist.

Der Nachweis lautet nach [10]; Gleichung (12-17) wie folgt:

$$\frac{N_{Og,Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{k_{z,z} \cdot M_{z,Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (4.33)$$

mit
$$N_{Og,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{I_y} \cdot S_y \quad (4.34)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_z A_{Og} f_y}{\gamma_{MI}} \quad \text{für Querschnitte der Klassen 1 bis 3} \quad (4.35)$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \quad \text{aber } \chi_z \leq 1,0 \quad (4.36)$$

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] \quad (4.37)$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_{z,Og} \lambda_1} \quad \text{für Querschnitte der Klassen 1 bis 3} \quad (4.38)$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (4.39)$$

$$M_{b,Rd} = \frac{W_{Og,z} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4.40)$$

mit $W_{Og,z} = W_{Og,z,pl}$ für Querschnitte der Klassen 1 bis 2

$$k_{z,z} = C_{mz} \left(1 + (2 \bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Og,Ed} \gamma_{M1}}{\chi_z A_{og} f_y} \right) \leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Og,Ed} \gamma_{M1}}{\chi_z A_{og} f_y} \right) \quad (4.41)$$

für Querschnitte der Klassen 1 bis 3

mit $C_{mz} = 0,9$ nach DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.3

Dabei ist

$M_{b,Rd}$ der Bemessungswert der Biegedrillknickbeanspruchbarkeit;

$N_{b,Rd}$ der Bemessungswert der Biegeknickbeanspruchbarkeit;

χ_z der Abminderungsfaktor für Biegeknicken um die z-z Achse;

$\bar{\lambda}_z$ der Bezugsschlankheitsgrad;

L_{cr} die Knicklänge (Einfeldträger: $L_{cr} = L$; sonst: $L_{cr} = 0,85L$);

$k_{z,z}$ der Interaktionswert;

C_m der äquivalente Momentenbeiwert;

α der Imperfektionsbeiwert nach Tabelle 4-3.

Knicklinie	a ₀	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabelle 4-3: Imperfektionsbeiwerte α für die Knicklinien [4]; S. 63, Tabelle 6.1

Die Auswahl der Knicklinie kann mittels DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.2 erfolgen.

4.5.2 Beulnachweise

4.5.2.1 Allgemeines

Bei Kranbahnträgern mit aufgesetztem Brückenlaufkran ist für den Steg ein Nachweis für Querlasten aus Radlasten zu führen, hierbei muss die seitliche Exzentrizität der Radlast nicht berücksichtigt werden. Die Bestimmung der Beanspruchbarkeit eines Trägersteges für Querlasten die über Obergurte eingeleitet werden erfolgt nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 6.

4.5.2.2 Beanspruchbarkeit des Steges unter Querbelastrung

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit bei Plattenbeulen unter Querbelastrung für ausgesteifte oder unausgesteifte Stegbleche kann wie folgt ermittelt werden:

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} l_{eff} t_w}{\gamma_{M1}} \quad (4.42)$$

Dabei ist

- t_w die Stegblechdicke;
- f_{yw} die Streckgrenze des Stegbleches;
- l_{eff} die wirksame Lastausbreitungslänge unter Berücksichtigung des Stegblechbeulens bei Querlasten: $l_{eff} = \chi_F l_y$;
- l_y die wirksame Lastausbreitungslänge ohne Stegbeulen, abhängig von der Länge s_s der starren Lasteinleitung;
- χ_F der Abminderungsfaktor infolge Stegbeulen bei Querlasten.

Der Abminderungsfaktor χ_F für die wirksame Lastausbreitungslänge wird ermittelt aus:

$$\chi_F = 0,5 / \bar{\lambda}_F \leq 1,0 \quad (4.43)$$

wobei gilt:

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{f_{yw} t_w l_v}{F_{cr}}} \quad (4.44)$$

$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad (4.45)$$

Für Kranbahnträger mit wandernder Radlast ist Typ (a) nach DIN EN 1993-1-5, 6.1(2) anzunehmen, dass die Radlasten einseitig über einen Flansch eingeleitet werden und im Gleichgewicht mit Querkraften im Steg stehen.

Der Faktor k_F für Stege ohne Längssteifen ist nach DIN EN 1993-1-5 (Abb. 4-7):

$$k_F = 6 + 2 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \quad (4.46)$$

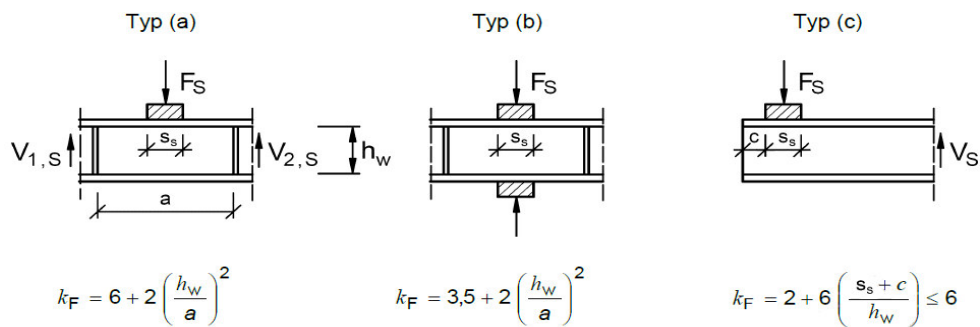


Abb. 4-8: Beulwerte für verschieden Arten der Lasteinleitung [5]; S. 31, Bild 6.1

Ohne Stegbeulen ist die wirksame Lastausbreitungslänge l_y für Typ (a) und (b) unter Verwendung der dimensionslosen Parameter m_1 und m_2 mit:

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \quad (4.47)$$

mit b_f Breite des Flansches

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_r} \right)^2 \quad \text{für } \bar{\lambda}_f > 0,5 \quad (4.48)$$

$$m_2 = 0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_f \leq 0,5$$

wie folgt zu berechnen:

$$l_y = s_s + 2t_f \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right) \quad \text{mit } l_y \leq a \quad (4.49)$$

wobei a der Abstand der Quersteifen ist.

Die Länge der starren Lasteinleitung s_s ist wie folgt zu berechnen:

$$s_s = l_{eff} - 2t_f \quad (4.50)$$

Dabei ist

l_{eff} die wirksame Lastausbreitungslänge an der Unterkante des Oberflansches nach Tabelle 4-2;

t_f die Flanschdicke.

Der Nachweis für Querlasten aus Radlasten ist wie folgt zu führen:

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{\frac{f_y l_{eff} t_w}{\gamma_{MI}}} = \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,0 \quad (4.51)$$

Bei dem zusätzlich zu führenden Interaktionsnachweis für Beulen infolge der lokalen Lasteinleitung und Beulen infolge der Biegenormalspannung ist nachzuweisen, dass:

$$\eta_2 + 0,8 \eta_1 \leq 1,4 \quad (4.52)$$

mit:
$$\eta_1 = \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{M_{y,Ed} \gamma_{M0}}{f_y W_{y,eff}} \quad (4.53)$$

$W_{y,eff} = W_{y,el}$ für Querschnitte der Klassen 1 bis 3

4.5.2.3 Flanschinduziertes Stegblechbeulen

Nach [10] ist nachzuweisen, dass ein Einknicken des Druckgurtes in den Steg vermieden wird, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_y} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (4.54)$$

mit

h_w lichte Höhe zwischen den Flanschen;

t_w	Stegdicke;
A_w	Stegfläche ($A_w = h_w t_w$);
A_{fc}	Fläche des Druckgurtes;
k	= 0,55 wenn elastische Querschnittstragfähigkeit ausgenutzt wird;
k	= 0,40 wenn plastische Querschnittstragfähigkeit ausgenutzt wird.

4.5.2.4 Beulnachweis der Druckflansche

Der Nachweis kann nach DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2 geführt werden mit:

$$c/t \leq \text{grenz } c/t \quad (4.55)$$

Weitere Nachweise für Kranbahnträger im Grenzzustand der Tragfähigkeit wie z.B. Nachweise für Schraub- und Schweißverbindungen, Schienenbefestigungen, Auflagerkonsolen, Quersteifen u.a. sollen hier nicht berücksichtigt werden.

4.6 Gebrauchstauglichkeitsnachweise

4.6.1 Verformungsberechnung

4.6.1.1 Vertikale Verformung

Die Durchbiegung (mit Eigengewicht) kann wie folgt ermittelt werden:

$$\delta_z = \frac{\gamma}{100} \cdot \frac{F \cdot l^3}{EI_y} + \beta \frac{g l^4}{EI_y} \quad (4.56)$$

mit $\beta = 0,0130$ (Einfeldträger) = 5/384

Als Grenzwert für die vertikale Durchbiegung gilt nach DIN EN 1993-6,NA:

$$\delta_z \leq L/500 \quad \text{und} \quad \delta_z \leq 25 \text{ mm} \quad (4.57)$$

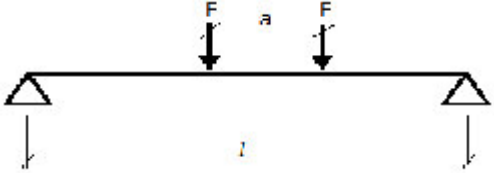
Einfeldträger					
					
a/l	γ	a/l	γ	a/l	γ
0,00	4,17	0,35	3,49	0,70	1,82 *)
0,05	4,15	0,40	3,30	0,75	1,53 *)
0,10	4,11	0,45	3,09	0,80	1,23 *)
0,15	4,03	0,50	2,86	0,85	0,93 *)
0,20	3,93	0,55	2,62	0,90	0,62 *)
0,25	3,81	0,60	2,37	0,95	0,31 *)
0,30	3,66	0,65	2,10	1,00	0,00 *)

Tabelle 4-4: Parameter für die Berechnung der Durchbiegung nach [10]; S. 233, Tab. 9-4

*) Falls ein Rad den Träger verlassen kann ist für Einfeldträger $\gamma = 2,08$ einzusetzen

4.6.1.2 Horizontale Verformung

Die Berechnung erfolgt nach Tragwirkungssplitting mit den maximalen Seitenlasten und unter Verwendung von Tabelle 4-4:

$$\delta_y = \frac{\gamma}{100} \cdot \frac{H_{fo} \cdot l^3}{EI_{z,Og}} \quad (4.58)$$

mit

H_{fo} die maximale dem Obergurt zugeordnete Horizontalkraft;

$I_{z,Og}$ das Trägheitsmoment des Obergurtes um die z-Achse.

Bei nur einer horizontalen Kraft in Trägermitte gilt:

$$\delta_y = \frac{1}{48} \cdot \frac{H_{fo} \cdot l^3}{EI_{z,Og}} \quad (4.59)$$

Als Grenzwert für die horizontale Durchbiegung gilt:

$$\delta_y \leq L/600 \quad (4.60)$$

Weitere Grenzwerte für Verformung und Verschiebung sind in DIN EN 1993-6, Abschnitt 7.3 festgelegt.

4.6.1.3 Begrenzung des Stegblechatmens

In Stegblechen ohne Längssteifen kann Stegblechatmen vernachlässigt werden, wenn:

$$\frac{b}{t_w} \leq 120 \quad (4.61)$$

anderenfalls ist folgender Nachweis zu führen:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed,ser}}{k_\sigma \sigma_E}\right)^2 + \left(1,1 \frac{\tau_{Ed,ser}}{k_\tau \sigma_E}\right)^2} \leq 1,1 \quad (4.62)$$

$$\sigma_E = \frac{190000}{(b/t_w)^2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.63)$$

Dabei ist

$\sigma_{x,Ed,ser}$	die Normalspannung im Steg;
$\tau_{x,Ed,ser}$	die Schubspannung im Steg;
b	die kleinere Seitenlänge des Stegbleches;
k_σ, k_τ	linear-elastische Beulwerte nach DIN EN 1993-1-5.

4.6.1.4 Nachweis für elastisches Verhalten

Um elastisches Verhalten zu gewährleisten sollten, insbesondere wenn plastische Querschnittsreserven in den Nachweisen genutzt wurden, die Spannungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wie folgt begrenzt werden:

$$\sigma_{v,ser} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{z,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{z,Ed} + 3\tau_{Ed}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M,ser}} \quad (4.64)$$

Dabei sind lokale und globale Spannungen zu berücksichtigen.

4.6.1.5 Schwingung des Unterflansches

Horizontale Schwingungen der Unterflansche von Kranbahnträgern sind zu vermeiden, dies gilt als erfüllt, wenn folgendes Kriterium eingehalten wird:

$$\frac{L}{i_z} \leq 250 \quad (4.65)$$

mit

L Abstand der seitlichen Halterung;

i_z Trägheitsradius des Unterflansches.

5 Ermüdung

5.1 Allgemeines

Unter tatsächlichen Betriebsbedingungen unterliegen verschiedenste Bauteile und Tragwerke wechselnden Einwirkungen, die sich während der Nutzungsdauer in ihrer Größe und/oder in ihrer Dauer verändern. Infolge des Auftretens dieser dynamischen Beanspruchungen ist für betroffene Tragwerke ein Ermüdungsnachweis erforderlich, da Stahl und andere metallische Werkstoffe unter wechselnder Beanspruchung geringere Spannungen ertragen, bzw. es früher zum Versagen kommt als bei ruhenden Beanspruchungen. Grundlage einer Untersuchung der Werkstoffermüdung sind Dauerschwingversuche die auf August Wöhler (1819-1914) zurückgehen. Dabei wird eine größere Menge genormter Proben oder Bauteile unter kontrollierten Bedingungen (Spannungen σ_A) dynamisch beansprucht, bis entweder eine bestimmte Lastspielzahl erreicht wurde, oder es zum Versagen kommt. Die Versuchsergebnisse werden als Wöhlerlinien für verschiedene Überlebenswahrscheinlichkeiten P_A dargestellt (Abb. 5-1).

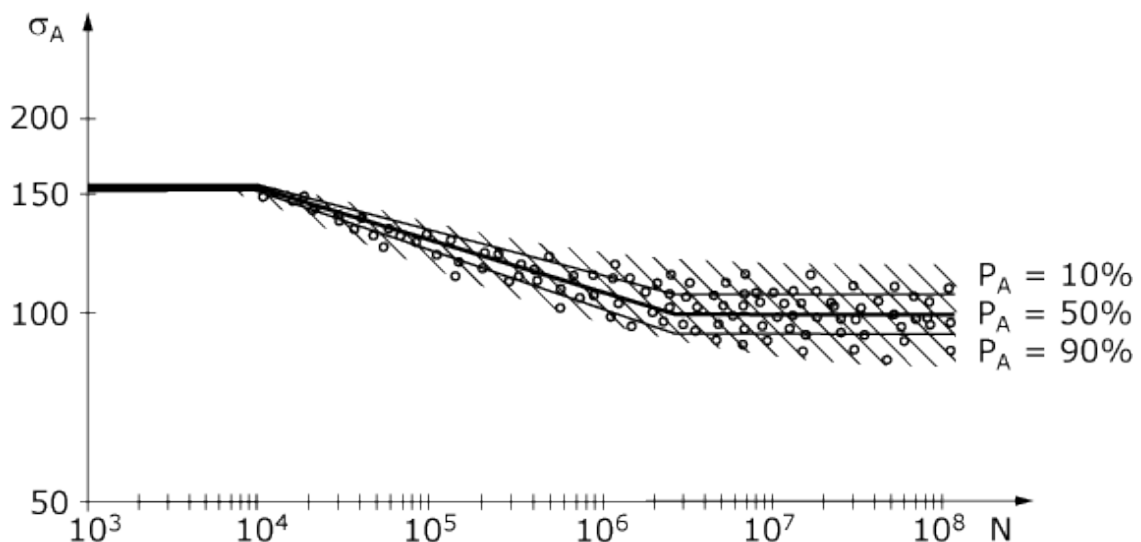


Abb. 5-1: Streubereich einer doppellogarithmisch dargestellten Wöhlerkurve mit verschiedenen Wahrscheinlichkeiten P_A für das schadloze Überstehen [20]

Überprüft man den Spannungsverlauf eines dynamische beanspruchten Trag-

werks oder Bauteils (an einer relevanten Stelle), könnte sich ein Verlauf gemäß Abb. 5-2 zeigen. Man erkennt, dass verschiedene Spannungsamplituden in unterschiedlichen zeitlichen Abfolgen auftreten, im Unterschied zu den Einstufenbelastungen des Wöhlerversuchs.

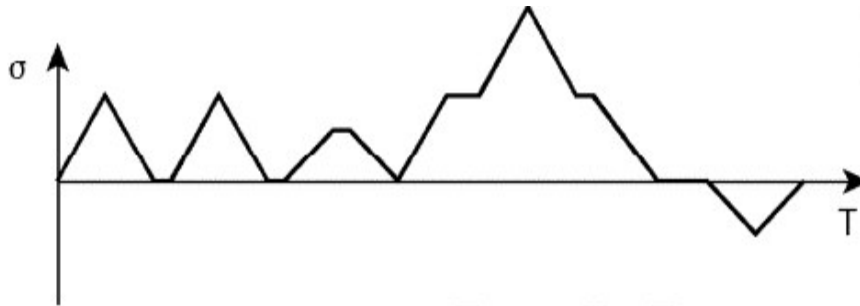


Abb. 5-2: Spannungszeitverlauf am Konstruktionsdetail [6]; Bild A.1b

Dieser Verlauf kann über die gesamte Nutzungsdauer extrapoliert und unter Anwendung geeigneter Klassifizierungsmethoden (Auszählverfahren), beispielsweise mittels Reservoir- oder Rainflow-Methode, bestimmt werden (Abb. 5-3). Fasst man die Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_i$ mit ihrer zugehörigen Anzahl von Schwingspielen N_i in absteigender Reihenfolge zusammen, erhält man das Spektrum der Spannungsschwingbreiten bzw. das Spannungskollektiv (Abb. 5-4). Für den Kranbau wurden standardisierte Kollektive eingeführt. Die Abbildung 5-5 zeigt die Spannungskollektive S0 bis S3. Die wichtigsten Parameter dieser Kollektive sind der Kollektivbeiwert p , die Völligkeit, die Extremwerte der Spannungen und die Anzahl der Schwingspiele.

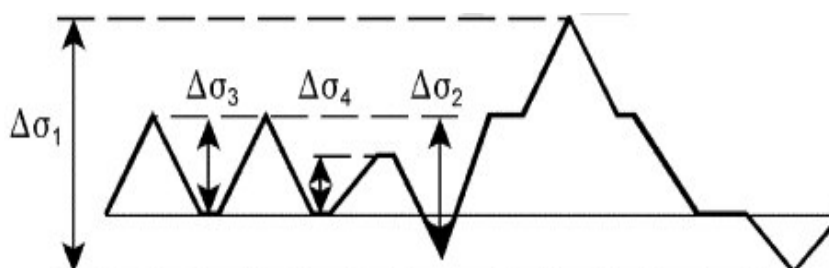


Abb. 5-3: Zählverfahren Reservoir-Methode [6]; Bild A.1c

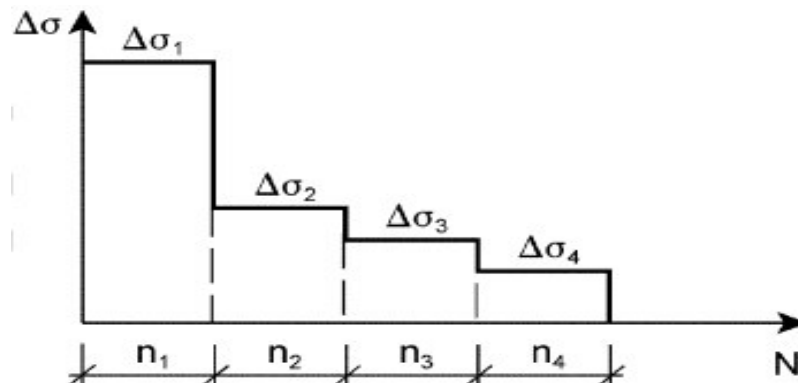


Abb. 5-4: Spektrum der Spannungsschwingbreiten [6]; Bild A.1d

Nicht für alle Tragwerke oder Bauteile lassen sich durch Versuche entsprechende Daten zur Ermittlung der Betriebsfestigkeit erlangen. Eine einfache Methode zur rechnerischen Betriebsfestigkeitsvorhersage ist die lineare Schadensakkumulation nach Palmgren/Miner. Dabei geht man, bei mehrstufigen Beanspruchungen, von einem (linearen) Schädigungsanteil (n_i/N_i) jeder n_i -mal auftretenden Spannung σ_i am Versagen (Bruch) aus. Abbildung 5-6 zeigt die maximalen Schwingspiele N_i der jeweiligen Spannungsschwingbreiten bis zum Versagen. Die lineare Schadensakkumulation nach Palmgren/Miner lautet:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} \leq D = 1 \quad (5.1)$$

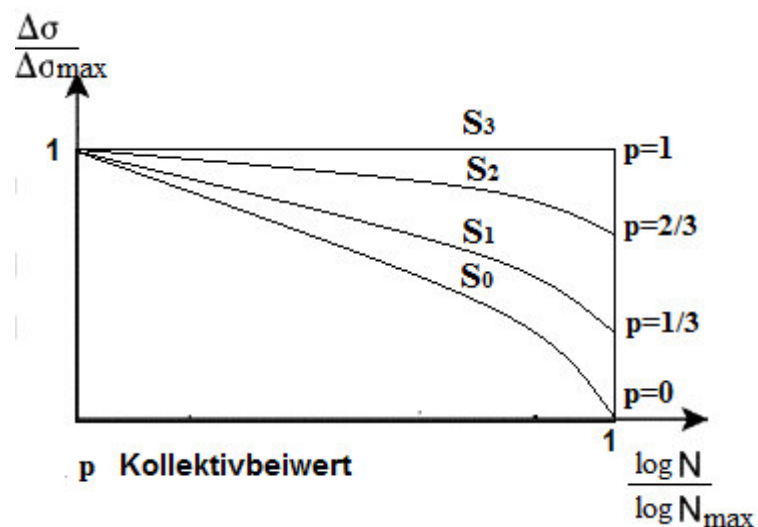


Abb. 5-5: Standardisierte Kollektive für Krane; eigene Zeichnung

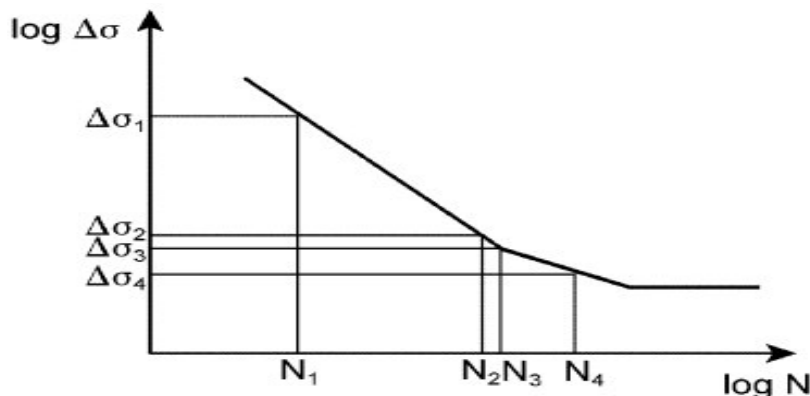


Abb. 5-6: Anzahl der Spannungsschwingbreiten bis zum Versagen [6];
Bild A.1e

Die lineare Schadensakkumulation berücksichtigt nicht die absinkende Dauerfestigkeit infolge von Werkstoffschädigungen und Reihenfolge bzw. Interaktionen von Belastungen bleiben ebenfalls unbetrachtet. Im EC3 wird diese Nichtlinearität durch ein Abknicken der Ermüdungsfestigkeitskurve (Anstieg $m = 5$) bei 5×10^6 Lastspielen (Dauerfestigkeit) bis zum Erreichen des Schwellenwertes der Ermüdungsfestigkeit bei 10^8 Lastspielen berücksichtigt. Abbildung 5-7 zeigt eine Ermüdungsfestigkeitskurve für Längsspannungsschwingbreiten.

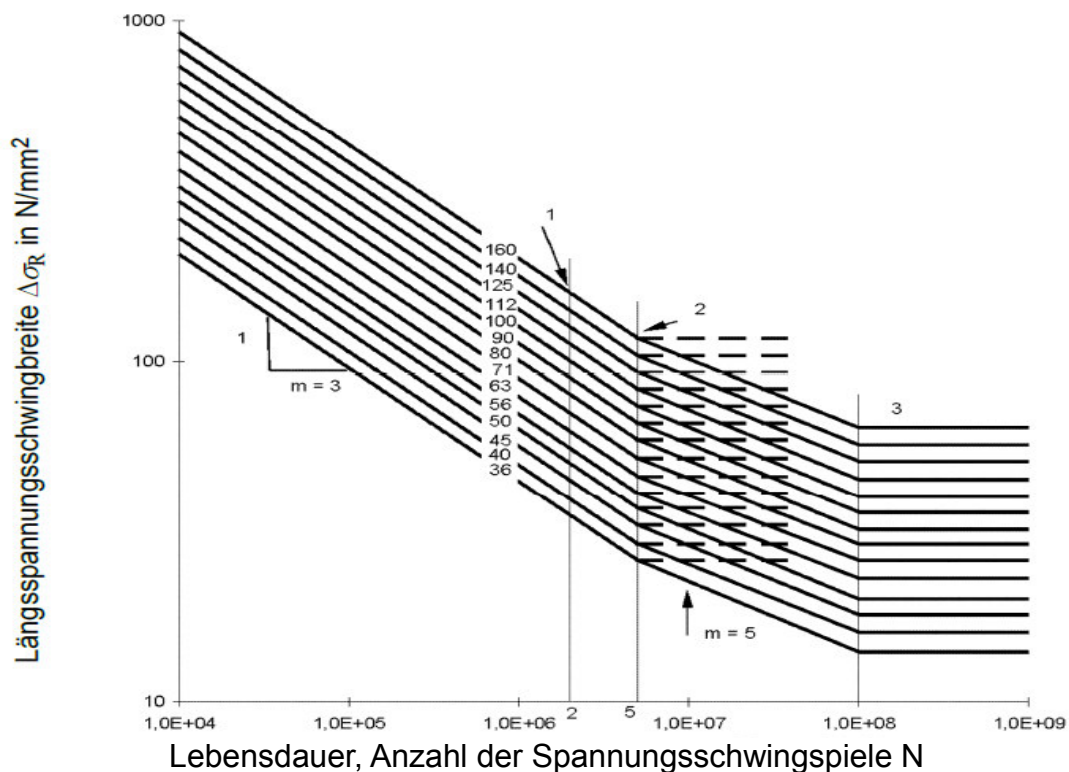


Abb. 5-7: Ermüdungsfestigkeitskurve für Längsspannungsschwingbreiten [6]; Bild 7.1

Legende

- 1 Kerbfall $\Delta\sigma_c$
- 2 Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$
- 3 Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$

Aufgrund der veränderlichen Beanspruchungen, die zu Spannungswechseln führen, ist für Kranbahnen ein Ermüdungsnachweis erforderlich, wenn mehr als 10^4 Lastwechsel mit mehr als 50% der vollen Nutzlast stattfinden, da Stahl und andere metallische Werkstoffe unter wechselnder Beanspruchung geringere Spannungen ertragen, bzw. es früher zum Versagen kommt als bei ruhenden Beanspruchungen. Die Anzahl von Spannungswechseln bis zum Bauteilversagen wird als Ermüdungsfestigkeit bezeichnet und hängt von verschiedenen Einflussgrößen ab. Den größten Einfluss haben die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$, als Differenz zwischen der maximalen und minimalen Spannung, und der Grad der Kerbwirkung. Weitere Einflussgrößen sind die Mittelspannung σ_m , das Spannungsverhältnis κ , Eigenspannungen, Bauteilgröße, Werkstoff, Temperatur und Korrosion. Die Ermüdungsfestigkeit wird durch den Wöhlerversuch ermittelt, die Ergebnisse sind als Wöhlerlinien aufbereitet. Der in DIN EN 1993-1-9 enthaltene Kerbfallkatalog zeigt für verschiedene Kerbdetails die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ als charakteristische Werte bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln. Beim Ermüdungsnachweis mittels schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{E,2}$ bzw. $\Delta\tau_{E,2}$, bezogen auf $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel (Standardverfahren), werden diese mit den zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerten γ_{Ff} den Bemessungswerten der Ermüdungsfestigkeit des untersuchten Kerbfalls gegenübergestellt:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (5.2)$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (5.3)$$

Bei gleichzeitiger Wirkung von Längs- und Schubspannungen lautet der Nachweis:

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1,0 \quad (5.4)$$

Der Ermüdungsnachweis kann nach zwei Bemessungskonzepten geführt werden. Vereinfacht kann die Wahl in Abhängigkeit von der Durchführung planmä-

ßiger Inspektionen und Wartung während der Nutzungsdauer getroffen werden. Wird ein Inspektionsprogramm festgelegt, kann nach dem Konzept der Schadenstoleranz bemessen werden, anderenfalls kann die Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung (durch erhöhte Teilsicherheitsbeiwerte) gewählt werden. In der Regel wird für Kranbahnen das Konzept der Schadenstoleranz mit hohen Schadensfolgen angewendet.

Abhängig vom gewählten Bemessungskonzept gelten die Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mf} nach Tabelle 5-1.

Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen $\gamma_{Ff} = 1,0$

Bemessungskonzept	Schadensfolgen	
	niedrig	hoch
Schadenstoleranz	1,00	1,15
Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung	1,15	1,35

Tabelle 5-1: Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mf} [6]; Tabelle 3.1

5.2 Ermüdungsbelastung

Die Veränderungen der Hublast und der Kranposition unter normalen Betriebsbedingungen bewirken Ermüdungslasten und veränderliche Spannungen, die im Bezug auf Kerbdetails zu berücksichtigen sind. Horizontale Lasten müssen im Regelfall nicht berücksichtigt werden. Für Beanspruchungsgruppen S 0 bis S 3 können Biegespannungen vernachlässigt werden. Vereinfacht dürfen nach EN 1991-3 sogenannte schadensäquivalente Ermüdungslasten Q_e ermittelt werden:

$$Q_e = \varphi_{fat,1} \cdot Q_c + \varphi_{fat,2} \cdot Q_h \quad (5.5)$$

Dabei ist

Q_c Eigengewicht der Krananlage mit Laufkatze ($Q_c = Q_{c,1} + Q_{c,2}$), siehe 3.3.3.1);

$Q_{h,nom}$ die Nennhublast;

$\varphi_{fat,i}$ der schadensäquivalente dynamische Faktor;

φ_1, φ_2 dynamischen Vergrößerungsfaktoren nach Tabelle 3-3.

mit

$$\varphi_{fat,1} = \frac{(1 + \varphi_1)}{2} \quad (5.6)$$

und

$$\varphi_{fat,2} = \frac{(1 + \varphi_2)}{2} \quad (5.7)$$

Die Einwirkungskombination lautet:

$$F_{Ed} = \gamma_{Ff} (\varphi_{fat,1} \cdot Q_c + \varphi_{fat,2} \cdot Q_h) \quad (5.8)$$

Mit der schadensäquivalenten Ermüdungsbelastung sind die maximalen Schnittgrößen und damit die maximalen und minimalen Spannungen ($\sigma_{x,max}$ und $\sigma_{x,min}$) zu ermitteln.

5.3 Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$

Die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ kann wie folgt berechnet werden:

a) für ungeschweißte/spannungsarm geglühte Bauteile

$$\Delta\sigma_x = |\sigma_{x,max}| + 0,6 |\sigma_{x,min}| \quad (5.9)$$

b) für geschweißte Bauteile

$$\Delta\sigma_x = |\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}| \quad (5.10)$$

Aufgrund der hohen Eigenspannungen in geschweißten Bauteilen wird unterstellt, dass die Ermüdungsfestigkeit nicht vom Vorzeichen und Niveau der Spannung beeinflusst wird, sondern nur durch die Spannungsschwingbreite. Daher darf nur für nichtgeschweißt oder spannungsarm geglühte Bauteile der Einfluss der Mittelspannung berücksichtigt werden.

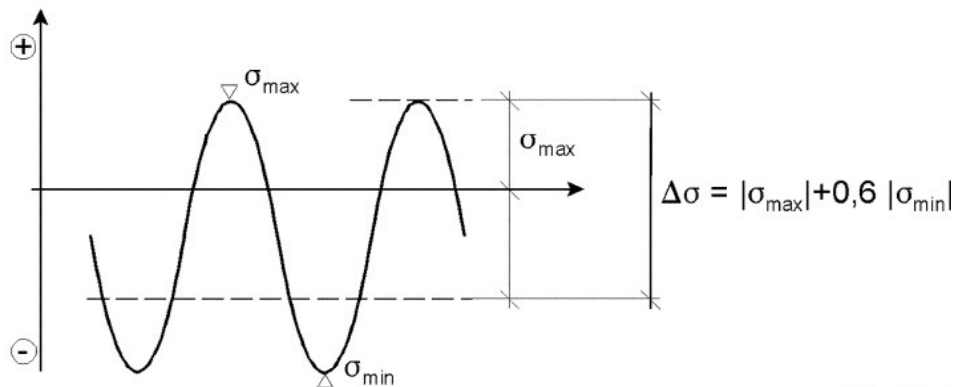


Abb. 5-8: Spannungsschwingbreite für ungeschweißte Bauteile [6], Bild 7.4

Legende

- + Zugspannung
- Druckspannung

5.4 Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{E,2}$

Die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite ergibt sich wie folgt:

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \Delta\sigma \quad (5.11)$$

mit

λ Schadensäquivalenter Beiwert nach Tabelle 5-2.

Klassen S	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉
Normalspannung	0,198	0,250	0,315	0,397	0,500	0,630	0,794	1,000	1,260	1,587
Schubspannung	0,397	0,436	0,500	0,575	0,660	0,758	0,871	1,000	1,149	1,320

Tabelle 5-2: Schadensäquivalenter Beiwert λ [3], Tabelle 2.12

Falls keine genauen Angaben zur Klassifizierung vorliegen, kann die S-Klasse nach DIN EN 1991-3, Tabelle B1 (siehe Tabelle 3-3) angenommen werden, andernfalls wird der Lastkollektivbeiwert k_Q berechnet, um eine Beanspruchungsgruppe nach DIN EN 1991-3, Tabelle 2.11 auszuwählen. Der Lastkollektivfaktor k_Q dient der Darstellung der kombinierten Ermüdungsauswirkungen verschiedener Nettolasten, die mit unterschiedlich vielen Arbeitsspielen bewältigt wur-

den und kann nach DIN EN 15011, Abschnitt A.2 wie folgt berechnet werden:

$$kQ = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C} \cdot \left(\frac{Q_i}{Q} \right)^3 \quad (5.12)$$

Dabei ist

- n die Anzahl der Arbeitsvorgänge, bei denen in jedem Arbeitsgang eine konstante Nettolast in Höhe von Q_i gehandhabt wird;
- C_i die Anzahl der Arbeitsspiele in einem Arbeitsgang, in dem eine Nettolast i der Größe Q_i gehandhabt wird;
- C die Gesamtanzahl der Arbeitsspiele (d. h. Summierung der C_i 's);
- Q_i die Größe einer Nettolast i , die während eines Arbeitsgangs konstant bleibt;
- Q die maximale Nettolast des Krans.

Klasse der Lastkollektive		Q_0	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
		$kQ \leq 0,0313$	$0,0313 < kQ \leq 0,0625$	$0,0625 < kQ \leq 0,125$	$0,125 < kQ \leq 0,25$	$0,25 < kQ \leq 0,5$	$0,5 < kQ \leq 1,0$
Klasse der Gesamtzahl von Arbeitsspielen							
U_0	$C \leq 1,6 \times 10^4$	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0
U_1	$1,6 \times 10^4 < C \leq 3,15 \times 10^4$	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_1
U_2	$3,15 \times 10^4 < C \leq 6,30 \times 10^4$	S_0	S_0	S_0	S_0	S_1	S_2
U_3	$6,30 \times 10^4 < C \leq 1,25 \times 10^5$	S_0	S_0	S_0	S_1	S_2	S_3
U_4	$1,25 \times 10^5 < C \leq 2,50 \times 10^5$	S_0	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4
U_5	$2,50 \times 10^5 < C \leq 5,00 \times 10^5$	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
U_6	$5,00 \times 10^5 < C \leq 1,00 \times 10^6$	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
U_7	$1,00 \times 10^6 < C \leq 2,00 \times 10^6$	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
U_8	$2,00 \times 10^6 < C \leq 4,00 \times 10^6$	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
U_9	$4,00 \times 10^6 < C \leq 8,00 \times 10^6$	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9

Tabelle 5-3: Lastkollektivfaktor kQ nach [3], Tabelle 2.11

6 Konstruktive Gestaltung

6.1 Einfluss des statischen Systems

Die Wahl des statischen Systems für einen zu dimensionierenden Kranbahnträger beeinflusst die auftretenden Schnittgrößen. So treten bei Einfeldträgern größere Feldmomente auf als bei Zwei- oder Mehrfeldträgern, allerdings sind keine Stützmomente oder abhebenden Kräfte vorhanden. Aus ökonomischer Sicht sind Ausbildung (biegesteif oder gelenkig) und Anzahl der Kranbahnträgerstöße zu berücksichtigen. Allgemein gilt der Zweifeldträger, aufgrund der geringeren auftretenden Schnittgrößen und Durchbiegungen und der weniger oft vorhandenen Stöße als wirtschaftlich sinnvolle Variante. Allerdings besitzt der Einfeldträger, besonders für den schweren Betrieb, einige Vorteile wie beispielsweise die durchgehend positiven Spannungsverhältnisse, die Unempfindlichkeit gegen Stützensetzungen und die einfachere Montage.

6.2 Querschnitte für Kranbahnträger

6.2.1 Allgemeines

Die Auswahl eines Querschnitts wird hauptsächlich von den Radlasten, der Beanspruchungsgruppe und der Trägerspannweite beeinflusst. Zur Einsatz können Walzprofile, I-Schweißprofile, zusammengesetzte Profile und Kastenträger kommen.

6.2.1.1 Walzprofile

Bis zu mittleren Profilgrößen können HEA- und HEB-Profile sinnvoll eingesetzt werden, bei großen Trägerhöhen werden sie allerdings unwirtschaftlich, da die Flanscbreite auf 30 cm begrenzt bleibt und das Verhältnis von I_y/I_z unvorteilhaft wird. Dieses Problem besteht allgemein bei IPE-Profilen, deshalb sind diese

ohne Verstärkung nicht geeignet. HEM-Profile haben nur in bestimmten Situationen Vorteile, z.B. wenn eine geringe Bauhöhe angestrebt werden muss, hohe Querschnitte der HEM-Reihe werden eingesetzt wenn andere Profile keine ausreichende Tragfähigkeit mehr bieten und der Einsatz von Schweißprofilen vermieden werden soll.

6.2.1.2 Schweißprofile

Vorteilhaft an Schweißprofilen aus drei Blechen ist, dass die Querschnitte optimal an die Beanspruchungen angepasst werden können, auch lassen sich geforderte b/t -Verhältnisse problemlos realisieren. Nachteilig wirken sich die Schweißnähte als Kerbfälle im Ermüdungsnachweis aus, deshalb sollte die Naht zwischen Obergurt und Steg als K-Naht ausgeführt werden, oder es wird ein zusammengesetzter Querschnitt in Betracht gezogen, da bei diesem die Schweißnaht nicht im Bereich der maximalen Spannungen liegt.

6.2.1.3 Zusammengesetzte Profile

Es werden allgemein zwei Formen für zusammengesetzte Profile empfohlen, einerseits I-Profile deren Obergurt mit Winkeln verstärkt wird und zum anderen Profile bei denen ein halbiertes Walzprofil als Obergurt (und Teilsteg) mit Blechen ergänzt wird.

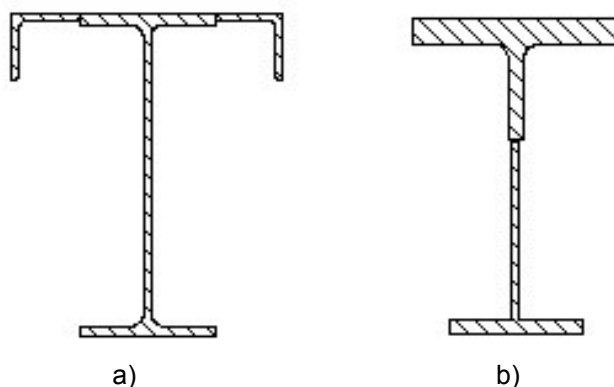


Abb. 6-1: Zusammengesetzte Profile a) Walzprofil mit Winkeln verstärkt; b) Halbiertes Walzprofil als Obergurt, eigene Zeichnung mit [14]

Auf weitere zusammengesetzte Querschnitte wird nicht eingegangen.

7 Beispiel

7.1 Allgemeines

Anhand des folgenden Berechnungsbeispiels sollen die in Kapitel 3 genannten Einwirkungen ermittelt, sowie die in Kapitel 4 behandelten Nachweise geführt werden. Bevor Querschnittsnachweise erfolgen, soll mittels einer überschlägigen Vordimensionierung ein geeigneter Querschnitt gewählt werden. Der Ermüdungsnachweis erfolgt im Anschluss an die Querschnitts- und Bauteilnachweise.

7.1.1 Allgemeine Angaben

Eine innen liegende Kranbahn, bestehend aus Einfeldträgern mit einer Stützweite von jeweils 6,50 m, wird von einem Zweiträger-Brückenlaufkran befahren.

Zum Kran liegen folgende Angaben vor:

- Hubklasse HC 4
- Beanspruchungsklasse S 4
- Antriebssystem IFF mit Radführung durch Spurkränze,
- Spannweite der Kranbrücke $l = 22,0 \text{ m}$,
- Radabstand $a = 3,60 \text{ m}$,
- Mindestabstand vom Auflager $e_{\min} = 1,20 \text{ m}$,
- Eigengewicht der Kranbrücke $Q_{C1,k} = 195 \text{ kN}$,
- Gewicht der Laufkatze $Q_{C2,k} = 18 \text{ kN}$,
- maximale Hublast $Q_{H,k} = 300 \text{ kN}$,
- Hubgeschwindigkeit $v_a = 5,0 \text{ m/min}$,
- Kranschiene Form A 75, geklemmt
- elastische Schienenunterlage 6 mm dick.

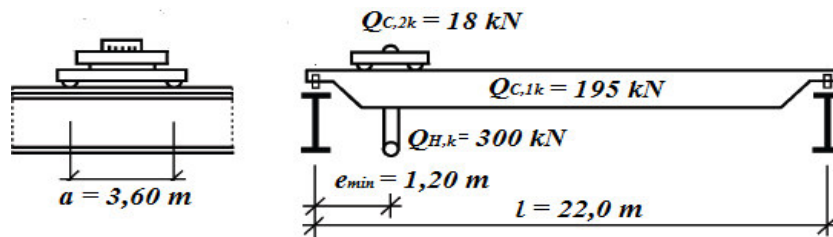


Abb. 7-1: Daten der Kranbrücke, eigene Zeichnung nach [3]; Bild 2.1

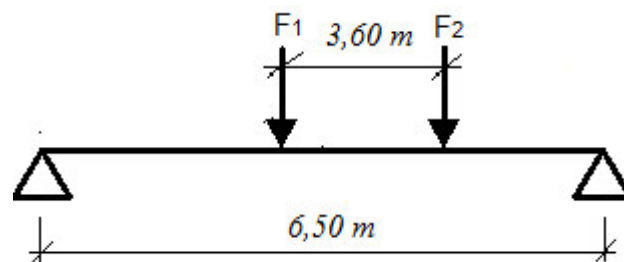


Abb. 7-2: Statisches System, eigene Zeichnung

7.1.2 Ermittlung der dynamischen Vergrößerungsfaktoren

Unter Berücksichtigung von Tabelle 3-2 ergeben sich folgende dynamische Vergrößerungsfaktoren:

$$\varphi_1 = 1,1$$

$$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 \cdot v_h = 1,20 + 0,68 \cdot \frac{5 \text{ m/min}}{60 \text{ sec/min}} = 1,26$$

$$\varphi_3 = 1 \quad \text{Annahme: kein plötzliches Loslassen } \Delta m = 0$$

$$\varphi_4 = 1 \quad \text{Annahme: Maßabweichungen werden eingehalten}$$

$$\varphi_5 = 1,5 \quad \text{System mit stetiger Veränderung der Kräfte}$$

Für Prüfkraft und Pufferkräfte sollen hier keine Nachweise geführt werden. Windeinwirkungen müssen hier nicht berücksichtigt werden, da eine innen liegende Kranbahn untersucht wird. Kollisionen der Hublast mit Hindernissen sind durch geeignete Sicherheitsmaßnahmen ausgeschlossen, deshalb werden Kippkräfte nicht betrachtet.

7.2 Ermittlung der veränderlichen Einwirkungen

7.2.1 Veränderliche vertikale Einwirkungen

7.2.1.1 Vertikale Radlasten

Es ergibt sich die Summe der maximalen Radlasten (vgl. Kapitel 3.3.3.1) für den belasteten Kran:

$$\begin{aligned}
 \Sigma Q_{r,max} &= \varphi_i \cdot \left[\frac{Q_{Cl}}{2} + Q_{C2} \cdot \left(\frac{l - e_{min}}{l} \right) \right] + \varphi_j \cdot Q_H \cdot \left(\frac{l - e_{min}}{l} \right) \\
 &= \varphi_i \cdot \left[\frac{195 \text{ kN}}{2} + 18 \text{ kN} \cdot \left(\frac{22,0 \text{ m} - 1,20 \text{ m}}{22,0 \text{ m}} \right) \right] \\
 &\quad + \varphi_j \cdot 300 \text{ kN} \cdot \left(\frac{22,0 \text{ m} - 1,20 \text{ m}}{22,0 \text{ m}} \right) \\
 \Sigma Q_{r,max} &= \varphi_i \cdot 114,5 \text{ kN} + \varphi_j \cdot 283,6 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Für die maximale Radlast pro Rad ergibt dies:

$$Q_{r,max} = \varphi_i \cdot 57,25 \text{ kN} + \varphi_j \cdot 141,8 \text{ kN}$$

Die Summe der zugehörigen Radlasten des belasteten Krans berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 \Sigma Q_{r,(max)} &= \varphi_i \cdot \left[\frac{Q_{Cl}}{2} + Q_{C2} \cdot \frac{e_{min}}{l} \right] + \varphi_j \cdot Q_H \cdot \frac{e_{min}}{l} \\
 &= \varphi_i \cdot \left[\frac{195 \text{ kN}}{2} + 18 \text{ kN} \cdot \frac{1,20 \text{ m}}{22,0 \text{ m}} \right] + \varphi_j \cdot 300 \text{ kN} \cdot \frac{1,20 \text{ m}}{22,0 \text{ m}} \\
 \Sigma Q_{r,(max)} &= \varphi_i \cdot 98,5 \text{ kN} + \varphi_j \cdot 16,4 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Für die zugehörige Radlast des belasteten Krans pro Rad ergibt dies:

$$Q_{r,(max)} = \varphi_i \cdot 49,25 \text{ kN} + \varphi_j \cdot 8,7 \text{ kN}$$

Mit den zuvor ermittelten dynamischen Vergrößerungsfaktoren können nun die Lastgruppen (vgl. Tabelle 3-4) untersucht werden. Nach [10] und [11] wird für Hallenkrane meist durch die Lastgruppe 1 bzw. Lastgruppe 5 die maßgebende Einwirkungskombination verursacht. Aus diesem Grund werden im Folgenden nur diese Lastgruppen betrachtet.

Lastgruppe 1:

$$\begin{aligned} Q_{r,max} &= \varphi_1 \cdot 57,25 \text{ kN} + \varphi_2 \cdot 141,8 \text{ kN} = 1,1 \cdot 57,25 \text{ kN} + 1,26 \cdot 141,8 \text{ kN} \\ &= 241,6 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{r,(max)} &= \varphi_1 \cdot 49,25 \text{ kN} + \varphi_2 \cdot 8,7 \text{ kN} = 1,1 \cdot 49,25 \text{ kN} + 1,26 \cdot 8,7 \text{ kN} \\ &= 65,1 \text{ kN} \end{aligned}$$

Lastgruppe 5:

$$\begin{aligned} Q_{r,max} &= \varphi_4 \cdot 57,25 \text{ kN} + \varphi_4 \cdot 141,8 \text{ kN} = 1,0 \cdot 57,25 \text{ kN} + 1,0 \cdot 141,8 \text{ kN} \\ &= 199,1 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{r,(max)} &= \varphi_4 \cdot 49,25 \text{ kN} + \varphi_4 \cdot 8,7 \text{ kN} = 1,0 \cdot 49,25 \text{ kN} + 1,0 \cdot 8,7 \text{ kN} \\ &= 57,9 \text{ kN} \end{aligned}$$

Die Summe der minimalen Radlasten des unbelasteten Krans berechnen sich auf folgende Art:

$$\begin{aligned} \Sigma Q_{r,min} &= \varphi_i \cdot \left[\frac{Q_{Cl}}{2} + Q_{C2} \cdot \frac{e_{min}}{l} \right] \\ &= \varphi_i \cdot \left[\frac{195 \text{ kN}}{2} + 18 \text{ kN} \cdot \frac{1,20 \text{ m}}{22,0 \text{ m}} \right] \\ \Sigma Q_{r,min} &= \varphi_i \cdot 95,7 \text{ kN} \end{aligned}$$

Für die minimale Radlast des unbelasteten Kran pro Rad ergibt dies:

$$Q_{r,min} = \varphi_i \cdot 47,85 \text{ kN}$$

Die Summe der zugehörigen Radlasten des unbelasteten Krans erhält man wie folgt:

$$\begin{aligned} \Sigma Q_{r,(min)} &= \varphi_i \cdot \left[\frac{Q_{C1}}{2} + Q_{C2} \cdot \left(\frac{l - e_{min}}{l} \right) \right] \\ &= \varphi_i \cdot \left[\frac{195 \text{ kN}}{2} + 18 \text{ kN} \cdot \left(\frac{22,0 \text{ m} - 1,20 \text{ m}}{22,0 \text{ m}} \right) \right] \\ \Sigma Q_{r,(min)} &= \varphi_i \cdot 114,5 \text{ kN} \end{aligned}$$

Für die zugehörige Radlast des unbelasteten Krans pro Rad ergibt dies:

$$Q_{r,(min)} = \varphi_i \cdot 57,25 \text{ kN}$$

Lastgruppe 1:

$$Q_{r,min} = \varphi_1 \cdot 47,85 \text{ kN} = 1,1 \cdot 47,85 \text{ kN} = 52,6 \text{ kN}$$

$$Q_{r,(min)} = \varphi_1 \cdot 57,25 \text{ kN} = 1,1 \cdot 57,25 \text{ kN} = 62,9 \text{ kN}$$

Lastgruppe 5:

$$Q_{r,min} = \varphi_4 \cdot 47,85 \text{ kN} = 1,0 \cdot 47,85 \text{ kN} = 47,85 \text{ kN}$$

$$Q_{r,(min)} = \varphi_4 \cdot 57,25 \text{ kN} = 1,0 \cdot 57,25 \text{ kN} = 57,25 \text{ kN}$$

7.2.1.2 Exzentrizität der Radlast

Die gegebene Kranschiene A 75 hat eine Schienenkopfbreite von $b_r = 75 \text{ mm}$. Die Exzentrizität ergibt sich damit zu:

$$e_y = 0,25 b_r = 0,25 \cdot 75 \text{ mm} = 18,8 \text{ mm}$$

7.2.2 Veränderliche horizontale Einwirkungen

7.2.2.1 Antriebskräfte

Für die mit zwei Einzelradantrieben ausgestattete Krananlage ergibt sich nach Gleichung (3.8) und (3.9) folgende Antriebskraft K :

mit $\mu = 0,2$ (Stahl auf Stahl)

$m_W = 2$ (2 Einzelradantriebe)

$$K = K_1 + K_2 = \mu \Sigma Q_{r,min}^* = \mu \cdot m_W \cdot Q_{r,min} = 0,2 \cdot 2 \cdot 47,85 \text{ kN} = 19,1 \text{ kN}$$

7.2.2.2 Horizontale Kräfte infolge Beschleunigen und Bremsen der Kranbrücke

Die längs der Kranbahn wirkenden horizontalen Kräfte $H_{L,i}$ können wie folgt berechnet werden:

Lastgruppe 1:

$$H_{L,i} = \varphi_5 \frac{K}{n_r} = 1,5 \cdot \frac{19,1 \text{ kN}}{2} = 14,3 \text{ kN} = H_{L,1} = H_{L,2}$$

mit n_r Anzahl der Kranbahnträger = 2

Für die infolge der außermittigen Katzstellung auftretenden horizontalen Kräfte $H_{T,i}$ quer zur Kranbahn (vgl. Abschnitt 3.3.4.3) ergeben sich mit

$$\xi_1 = \frac{\Sigma Q_{r,max}}{\Sigma Q_r} = \frac{483,2 \text{ kN}}{613,4 \text{ kN}} = 0,79$$

$$\xi_2 = 1 - \xi_1 = 1 - 0,79 = 0,21$$

$$\Sigma Q_r = \Sigma Q_{r,max} + \Sigma Q_{r,(max)} = 483,2 \text{ kN} + 130,2 \text{ kN} = 613,4 \text{ kN}$$

$$\Sigma Q_{r,max} = 2 Q_{r,max} = 2 \cdot 241,6 \text{ kN} = 483,2 \text{ kN}$$

$$\Sigma Q_{r,(max)} = 2Q_{r,(max)} = 2 \cdot 65,1 \text{ kN} = 130,2 \text{ kN}$$

$$l_s = (\xi_1 - 0,5) \cdot l = (0,79 - 0,5) \cdot 22,0 \text{ m} = 6,4 \text{ m}$$

$$M = K \cdot l_s = 19,1 \text{ kN} \cdot 6,4 \text{ m} = 122,2 \text{ kNm}$$

folgende Werte:

$$H_{T,1} = \varphi_5 \cdot \xi_2 \cdot \frac{M}{a} = 1,5 \cdot 0,21 \cdot \frac{122,2 \text{ kNm}}{3,60 \text{ m}} = 10,7 \text{ kN}$$

$$H_{T,2} = \varphi_5 \cdot \xi_1 \cdot \frac{M}{a} = 1,5 \cdot 0,79 \cdot \frac{122,2 \text{ kNm}}{3,60 \text{ m}} = 40,2 \text{ kN}$$

mit

$$a = 3,60 \text{ m}$$

7.2.2.3 Horizontale Kräfte infolge Schräglauf

Für die Schiene und die Führungsrollen sind folgende Daten gegeben (siehe Abb. 7-3):

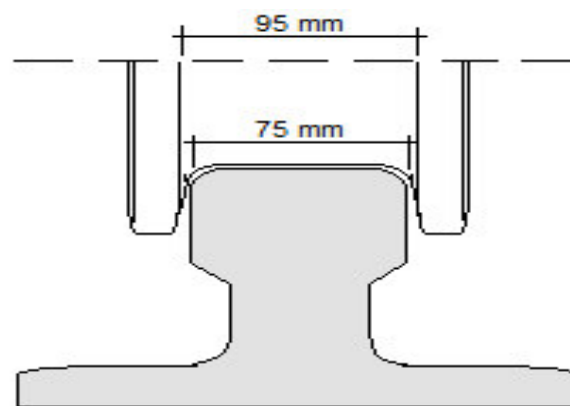


Abb. 7-3: Kranlaufrad, eigene Zeichnung nach [11]; Bild 2.6a

Schienenkopfbreite $b_r = 75 \text{ mm}$,

Spurkranzabstand $b_{Sp} = 95 \text{ mm}$,

Querschlupf $x = b_{Sp} - b_r = 95 \text{ mm} - 75 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$

Nach Tabelle 3-7 wird der Schräglaufwinkel α berechnet zu:

$$\alpha_F = \frac{0,75x}{a_{ext}} = \frac{0,75 \cdot 20 \text{ mm}}{3600 \text{ mm}} = 0,0042 \text{ rad}$$

mit $0,75x = 0,75 \cdot 20 \text{ mm} = 15 \text{ mm} \geq 10 \text{ mm}$

$$\alpha_V = \frac{y}{a_{ext}} = \frac{0,1 \cdot b_r}{a_{ext}} = \frac{0,1 \cdot 75 \text{ mm}}{3600 \text{ mm}} = 0,0021 \text{ rad}$$

$$\alpha_0 = 0,001 \text{ rad}$$

$$\alpha = \alpha_F + \alpha_V + \alpha_0 = 0,0042 + 0,0021 + 0,001 = 0,0073 \text{ rad} \leq 0,015 \text{ rad}$$

Damit berechnet sich der Kraftschlußbeiwert f zu:

$$f = 0,3 \cdot (1 - e^{(-250\alpha)}) = 0,3 \cdot (1 - e^{(-250 \cdot 0,0073)}) = 0,25 \leq 0,3$$

Die Führungskraft S ergibt sich dann wie folgt:

Lastgruppe 5:

$$S = f \cdot \lambda_{S,j} \cdot \Sigma Q_r = 0,25 \cdot 0,5 \cdot 613,4 \text{ kN} = 76,7 \text{ kN}$$

Nach Tabelle 3-8 und Abb. 3-6 werden für den Kran mit Antriebssystem IFF und 2 Radpaaren die folgenden Werte ermittelt:

$$h = \frac{m \xi_1 \xi_2 l^2 + \Sigma e_j^2}{\Sigma e_j} = \frac{0 + 3,6^2 \text{ m}^2}{3,6 \text{ m}} = 3,6 \text{ m}$$

mit

$m = 0$ da keine gekoppelten Radpaare, sondern Einzelradantrieb
 $e_1 = 0$ Radpaarachse 1 ist die Achse mit den Spurkränzen
 $e_2 = a = h$ Radpaarachse 2
 $n = 2$ Anzahl der Radpaare

$$\lambda_{S,j} = 1 - \frac{\Sigma e_j}{n \cdot h} = 1 - \frac{3600 \text{ mm}}{2 \cdot 3600 \text{ mm}} = 0,5$$

Die Reaktionskräfte $H_{S,ij,k}$ ergeben sich zu:

$$H_{S,1,j,L}=0 \quad \text{für IFF}$$

$$H_{S,2,j,L}=0 \quad \text{für IFF}$$

$$H_{S,1,1,T}=f \cdot \lambda_{S,1,1,T} \cdot \Sigma Q_r = 0,25 \cdot \frac{\xi_2}{n} \cdot \left(1 - \frac{e_1}{h}\right) \cdot \Sigma Q_r$$

$$= 0,25 \cdot \frac{0,21}{2} = 613,4 \text{ kN} = 16,1 \text{ kN}$$

$$H_{S,2,1,T}=f \cdot \lambda_{S,2,1,T} \cdot \Sigma Q_r = 0,25 \cdot \frac{\xi_1}{n} \cdot \left(1 - \frac{e_1}{h}\right) \cdot \Sigma Q_r$$

$$= 0,25 \cdot \frac{0,79}{2} = 613,4 \text{ kN} = 60,6 \text{ kN}$$

$$H_{S,1,2,T}=f \cdot \lambda_{S,2,1,T} \cdot \Sigma Q_r = 0,25 \cdot \frac{\xi_1}{n} \cdot \left(1 - \frac{e_2}{h}\right) \cdot \Sigma Q_r = 0$$

$$H_{S,2,2,T}=f \cdot \lambda_{S,2,1,T} \cdot \Sigma Q_r = 0,25 \cdot \frac{\xi_2}{n} \cdot \left(1 - \frac{e_2}{h}\right) \cdot \Sigma Q_r = 0$$

Am hinteren Radpaar treten keine Reaktionskräfte auf, am vorderen Radpaar herrscht ein Gleichgewicht zwischen der Schräglaukraft S und den Reaktionskräften $H_{S,1,1,T}$ und $H_{S,2,1,T}$:

$$S - H_{S,1,1,T} = 70,6 \text{ kN} - 16,1 \text{ kN} = H_{S,2,1,T} = 60,6 \text{ kN}$$

7.2.3 Außergewöhnliche Einwirkungen

7.2.3.1 Pufferkräfte infolge Anprall der Laufkatze

Die Pufferkräfte infolge des Anpralls der Laufkatze ergeben sich mit 10% der Summe aus Eigengewicht der Laufkatze und der Hublast zu:

$$H_{B,2} = (Q_{C2} + Q_H) \cdot 0,1 = (18 \text{ kN} + 300 \text{ kN}) \cdot 0,1 = 31,8 \text{ kN}$$

Die Pufferkraft wird in den Lastgruppen 1 und 5 nicht berücksichtigt, da sie nicht

maßgebend ist wird die Lastgruppe 8 nicht betrachtet. Weitere Einwirkungen werden hier nicht untersucht.

7.2.4 Zusammenfassung der charakteristischen Einwirkungen

Es werden in Tabelle 7-1 nur die (maßgebenden) maximalen Radlasten und die relevanten Lastgruppen nach Tabellen 3-4 und 3-5 berücksichtigt. Die für die Einwirkungskombination zu betrachtenden Kräfte sind hervorgehoben.

Die Angaben zu Radlasten und horizontalen Kräften werden im Allgemeinen vom Kranhersteller angegeben. Dabei ist zu beachten, ob bereits dynamische Vergrößerungsfaktoren berücksichtigt wurden.

Grenzzustand	Grenzzustand der Tragfähigkeit		Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit		
Lastgruppe	1	5	11	12	13
$Q_{r,max}$	241,6	199,1	199,1	199,1	199,1
$H_{L,1}/H_{L,2}$	14,3	-	-	-	9,5*
$H_{T,1}$	10,7	-	-	-	7,1*
$H_{T,2}$	40,2	-	-	-	26,8*
S	-	76,7	-	76,7	-
$H_{S,1,1,T}$	-	16,1	-	16,1	-
$H_{S,2,1,T}$	-	60,6	-	60,6	-

Tabelle 7-1: Zusammenstellung der charakteristischen Einwirkungen [kN]

* Die Werte ergeben sich aus den entsprechenden Werten der Lastgruppe 1 dividiert durch 1,5, da für Lastgruppe 13 der dynamische Vergrößerungsfaktor auf 1,0 festgelegt wurde.

7.3 Einwirkungskombinationen

Die verschiedenen veränderlichen Einwirkungen der Lastgruppen werden nicht als einzelne Einwirkungen berücksichtigt, sondern jeweils als eine einzige veränderliche Last. Unter Berücksichtigung des Kranbahnträgereigengewichtes als ständige Einwirkung und jeweils einer Lastgruppe als veränderliche Einwirkung

(Leiteinwirkung) ist folgende Einwirkungskombination zu bilden:

a) im Grenzzustand der Tragfähigkeit

- ständige Kombination

$$E_d = 1,35 \cdot \text{Kranbahnträgereigengewicht} + 1,35 \cdot \text{Lastgruppe 1 bis 8}$$

b) im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

- charakteristische Kombination

$$E_d = 1,0 \cdot \text{Kranbahnträgereigengewicht} + 1,0 \cdot \text{Lastgruppe 11 bis 13}$$

- häufige Kombination

$$E_d = 1,0 \cdot \text{Kranbahnträgereigengewicht} + \psi_1 \cdot 1,0 \cdot \text{Lastgruppe 11 bis 13}$$

7.4 Querschnittsauswahl

7.4.1 Vorbetrachtung

Im Folgenden sollen (überschlägig) die maximalen Biegemomente um die y-y Achse und die z-z Achse ermittelt werden. Um eine Vordimensionierung des Kranbahnträgerquerschnitts durchzuführen, wird der (konservative) Spannungsnachweis verwendet. Es soll ein tragfähiger, wirtschaftlich sinnvoller Querschnitt gewählt werden.

Das maximale Biegemoment $M_{y,k}$ bzw. $M_{z,k}$ ergibt sich unter der Bedingung:

$$a = 3,60 \text{ m} < 0,586 l = 0,586 \cdot 6,50 \text{ m} = 3,81 \text{ m}$$

a) für Lastgruppe 1 zu:

$$M_y = \frac{F \cdot l}{8} \cdot \left(2 - \frac{a}{l}\right)^2 = \frac{241,6 \text{ kN} \cdot 6,50 \text{ m}}{8} \cdot \left(2 - \frac{3,60 \text{ m}}{6,50 \text{ m}}\right)^2 = 410,5 \text{ kNm}$$

b) für Lastgruppe 5 zu:

$$M_z = \frac{H \cdot l}{4} = \frac{60,6 \text{ kN} \cdot 6,50 \text{ m}}{4} = 98,5 \text{ kNm}$$

Das für die Querschnittsnachweise zu berücksichtigende Biegemoment M_z wird später mittels H_{fo} (Tragwirkungssplitting) berechnet und wird aufgrund des aufgeteilten Torsionsmoments größer ausfallen.

Betrachtet man das Verhältnis der Biegemomente $M_y/M_z = 410,5/98,5 \approx 4/1$ und vergleicht dies mit dem Verhältnis der elastischen Widerstandsmomente W_y/W_z von breiten Walzprofilen, zeigt sich mit steigender Profilgröße eine zunehmend unwirtschaftliche Tendenz.

Folgende Walzprofile weisen ein W_y/W_z -Verhältnis von ca. 4/1 auf:

$$\text{- HEA 400: } \frac{W_y}{W_z} = \frac{2310 \text{ cm}^3}{571 \text{ cm}^3} = 4,04$$

$$\text{- HEB 400: } \frac{W_y}{W_z} = \frac{2880 \text{ cm}^3}{721 \text{ cm}^3} = 3,99$$

$$\text{- HEM 400: } \frac{W_y}{W_z} = \frac{4820 \text{ cm}^3}{1260 \text{ cm}^3} = 3,83$$

Nachweise (vereinfacht):

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{Rd}} < 1,0 \quad \text{mit} \quad \sigma_{Rd} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad \text{für S 235}$$

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{el,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{W_{fo,el,z}} \quad \text{mit } W_{fo,el,z} = W_{el,z}/2$$

$$\begin{aligned} \text{- HEM 400: } \sigma_{x,Ed} &= \frac{M_{y,Ed}}{W_{el,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{W_{fo,el,z}} = 1,35 \cdot \frac{41050 \text{ kNcm}}{4820 \text{ cm}^3} + 1,35 \cdot \frac{9850 \text{ kNcm}}{630 \text{ cm}^3} \\ &= 11,49 + 21,11 = 32,60 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \end{aligned}$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{Rd}} = \frac{32,6 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2} = 1,39 > 1,0 \quad \text{Nachweis nicht erfüllt}$$

Die Nachweise für HEA 400 und HEB 400 sind offensichtlich nicht erfüllt und werden hier nicht durchgeführt. Aufgrund des großen Einflusses der Biegung um die schwache Achse kommen Walzprofile der Sorte S 235 als wirtschaftlich

sinnvolle Querschnitte nicht in Frage. Alternativ könnte die Stahlsorte S 355 verwendet werden.

Weitere Optionen sind ein Schweißprofil aus drei Blechen, die einzeln optimiert werden können, oder ein mit Winkeln verstärktes Walzprofil. Hier soll ein Schweißprofil aus S 235 verwendet werden, dessen Obergurt nach folgender Überlegung vordimensioniert wird:

$$\frac{M_{z,Ed}}{W_{fo,el,z}} \leq \frac{\sigma_{Rd}}{2}$$

$$\frac{M_{z,Ed}}{\sigma_{Rd}/2} \leq W_{fo,el,z} = 1,35 \cdot \frac{9850 \text{ kNcm}}{11,75 \text{ kN/cm}^2} = 1132 \text{ cm}^3 \leq W_{fo,el,z}$$

Mit folgenden gewählten Abmessungen:

$$b_{fo} = 450 \text{ mm}, t_{fo} = 35 \text{ mm}$$

ergibt sich ein Trägheitsmoment des Obergurtes $I_{fo,z}$:

$$I_{fo,z} = \frac{b_{fo}^3 \cdot t_{fo}}{12} = \frac{45^3 \text{ cm}^3 \cdot 3,5 \text{ cm}}{12} = 26578,1 \text{ cm}^4$$

und ein Widerstandsmoment $W_{fo,el,z}$:

$$W_{fo,el,z} = \frac{I_{fo,z}}{b_{fo}/2} = \frac{26578,1 \text{ cm}^4}{22,5 \text{ cm}} = 1181,25 \text{ cm}^3 > 1132 \text{ cm}^3$$

Des weiteren werden folgende Abmessungen gewählt:

Stegblech: $h_w = 450 \text{ mm}, t_w = 20 \text{ mm}$

Untergurt: $b_{fu} = 300 \text{ mm}, t_{fu} = 25 \text{ mm}$

7.5 Querschnittswerte

7.5.1 Kranbahnträger

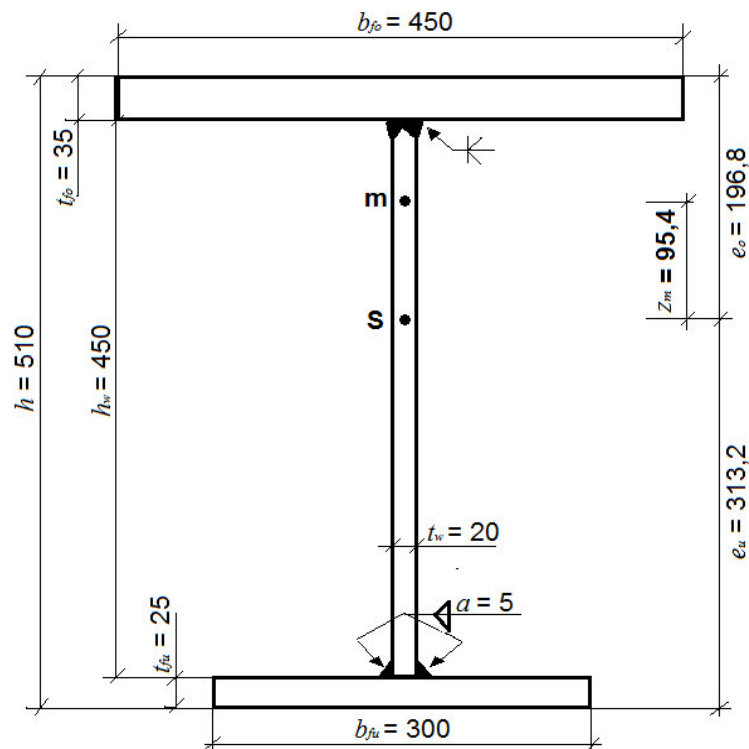


Abb. 7-4: Abmessungen des Schweißprofils [mm], eigene Zeichnung

Abmessungen:

Oberflanschbreite: b_{fo} = 450 mm

Oberflanschdicke: t_{fo} = 35 mm

Stegblechhöhe: h_w = 450 mm

Stegblechdicke: t_w = 20 mm

Unterflanschbreite: b_{fu} = 300 mm

Unterflanschdicke: t_{fu} = 25 mm

Gesamthöhe: h = $h_w + t_{fo} + t_{fu}$ = 450 + 35 + 25 = 510 mm

Querschnittsflächen:

$$\text{Oberflansch: } A_{fo} = b_{fo} t_{fo} = 45,0 \text{ cm} \cdot 3,50 \text{ cm} = 157,5 \text{ cm}^2$$

$$\text{Steg: } A_w = h_w t_w = 45,0 \text{ cm} \cdot 2,00 \text{ cm} = 90,0 \text{ cm}^2$$

$$\text{Unterflansch: } A_{fu} = b_{fu} t_{fu} = 30,0 \text{ cm} \cdot 2,50 \text{ cm} = 75,0 \text{ cm}^2$$

$$\text{Gesamtquerschnitt: } A_{ges} = A_{fo} + A_w + A_{fu} = 157,5 + 90,0 + 75,0 = 322,5 \text{ cm}^2$$

Schwerpunkt:

von Oberkante Oberflansch:

$$e_o = \frac{A_{fo} \cdot t_{fo} / 2 + A_w \cdot (t_{fo} + h_w / 2) + A_{fu} \cdot (h - t_{fu} / 2)}{A_{ges}}$$

$$= \frac{157,5 \cdot 3,5 / 2 + 90,0 \cdot (3,5 + 45,0 / 2) + 75,0 \cdot (51,0 - 2,5 / 2)}{322,5} = 19,68 \text{ cm}$$

von Unterkante Unterflansch:

$$e_u = h - e_o = 51,0 - 19,68 = 31,32 \text{ cm}$$

Statisches Moment:

Übergang Oberflansch-Steg:

$$S_{fo,y} = A_{fo} \cdot (e_o - t_{fo} / 2) = 157,5 \text{ cm}^2 \cdot (19,68 \text{ cm} - 3,5 \text{ cm} / 2) = 2823,97 \text{ cm}^3$$

Schwerpunkt:

$$S_y = S_{fo,y} + (e_o - t_{fo})^2 \cdot t_w / 2 = 2823,97 \text{ cm}^3 + (19,68 \text{ cm} - 3,5 \text{ cm})^2 \cdot 2,0 \text{ cm} / 2$$

$$= 3085,76 \text{ cm}^3$$

Übergang Unterflansch-Steg:

$$S_{fu,y} = A_{fu} \cdot (e_u - t_{fu} / 2) = 75,0 \text{ cm}^2 \cdot (31,32 \text{ cm} - 2,5 \text{ cm} / 2) = 2255,25 \text{ cm}^3$$

Trägheitsmomente:

Oberflansch:

$$I_{f_o,z} = \frac{b_{f_o}^3 \cdot t_{f_o}}{12} = \frac{45^3 \text{ cm}^3 \cdot 3,5 \text{ cm}}{12} = 26578,1 \text{ cm}^4$$

Unterflansch:

$$I_{f_u,z} = \frac{b_{f_u}^3 \cdot t_{f_u}}{12} = \frac{30^3 \text{ cm}^3 \cdot 2,5 \text{ cm}}{12} = 5625,0 \text{ cm}^4$$

Gesamtquerschnitt:

$$\begin{aligned} I_y &= t_{f_o}^3 \cdot b_{f_o} / 12 + h_w^3 \cdot t_w / 12 + t_{f_u}^3 \cdot b_{f_u} / 12 + A_{f_o} \cdot (e_o - t_{f_o} / 2)^2 \\ &\quad + A_w \cdot (h_w / 2 + t_{f_o} - e_o)^2 + A_{f_u} \cdot (e_u - t_{f_u} / 2)^2 \\ &= 3,50^3 \text{ cm}^3 \cdot 45,0 \text{ cm} / 12 + 45^3 \text{ cm}^3 \cdot 2,0 \text{ cm} / 12 + 2,5^3 \text{ cm}^3 \cdot 30,0 \text{ cm} / 12 \\ &\quad + 157,5 \text{ cm}^2 \cdot (19,68 \text{ cm} - 3,5 \text{ cm} / 2)^2 \\ &\quad + 90,0 \text{ cm}^2 \cdot (45 \text{ cm} / 2 + 3,5 \text{ cm} - 19,68 \text{ cm})^2 + 75 \text{ cm}^2 \cdot (31,32 \text{ cm} - 2,5 \text{ cm} / 2)^2 \\ &= 160,78 \text{ cm}^4 + 15187,5 \text{ cm}^4 + 39,06 \text{ cm}^4 + 50633,87 \text{ cm}^4 + 3594,82 \text{ cm}^4 \\ &\quad + 67815,37 \text{ cm}^4 = 137431,4 \text{ cm}^4 \\ I_z &= I_{f_o,z} + I_{f_u,z} = 26578,1 + 5625,0 = 32203,1 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

Schubmittelpunkt:

Abstand zum Schwerpunkt:

$$\begin{aligned} z_m &= \frac{1}{I_z} \left((e_o - \frac{t_{f_o}}{2}) \cdot I_{f_o,z} - (e_u - \frac{t_{f_u}}{2}) \cdot I_{f_u,z} \right) \\ &= \frac{1}{32203,1} \left(\left(19,68 - \frac{3,5}{2} \right) \cdot 26578,1 - \left(31,32 - \frac{2,5}{2} \right) \cdot 5625,0 \right) = 9,54 \text{ cm} \end{aligned}$$

Der Schubmittelpunkt liegt näher am Flansch mit dem größeren Trägheitsmoment, hier also um 9,54 cm entfernt vom Schwerpunkt Richtung Oberflansch.

Elastische Widerstandsmomente:

Oberflansch:

$$W_{fo,el,z} = \frac{I_{fo,z}}{b_{fo}/2} = \frac{26578,1 \text{ cm}^4}{22,5 \text{ cm}} = 1181,25 \text{ cm}^3$$

Unterflansch:

$$W_{fu,el,z} = \frac{I_{fu,z}}{b_{fu}/2} = \frac{5625,0 \text{ cm}^4}{15,0 \text{ cm}} = 375,0 \text{ cm}^3$$

Gesamtquerschnitt:

Oberkante Oberflansch:

$$W_{fo,el,y} = \frac{I_y}{e_o} = \frac{137431,4 \text{ cm}^4}{19,68 \text{ cm}} = 6983,30 \text{ cm}^3$$

Unterkante Unterflansch:

$$W_{fu,el,y} = \frac{I_y}{e_u} = \frac{137431,4 \text{ cm}^4}{31,32 \text{ cm}} = 4387,98 \text{ cm}^3$$

plastische Widerstandsmomente:

Lage der plastischen Nulllinie:

$$A_{fo} = 157,5 \text{ cm}^2 < A_{ges}/2 = 322,5 \text{ cm}^2/2 = 161,25 \text{ cm}^2 \quad \text{pl. Nulllinie im Steg}$$

Lage bezogen auf Oberkante Oberflansch:

$$e_{o,pl} = \frac{(A_{ges}/2 - A_{fo})}{t_w} + t_{fo} = \frac{(322,5/2 - 157,5)}{2,0} + 3,5 = 5,52 \text{ cm}$$

Lage bezogen auf Unterkante Unterflansch:

$$e_{u,pl} = h - e_{o,pl} = 51,0 - 5,52 = 45,48 \text{ cm}$$

Oberflansch:

$$W_{fo,pl,z} = \frac{b_{fo}^2 \cdot t_{fo}}{4} = \frac{45,0^2 \text{ cm}^2 \cdot 3,5 \text{ cm}}{4} = 1771,87 \text{ cm}^3$$

Gesamtquerschnitt:

$$\begin{aligned} W_{pl,y} &= A_{fo} \cdot (e_{pl,o} - t_{fo}/2) + t_w \cdot (e_{pl,o} - t_{fo})^2/2 + t_w \cdot (e_{pl,u} - t_{fu})^2/2 \\ &+ A_{fu} \cdot (e_{pl,u} - t_{fu}/2) = 157,5 \cdot (5,52 - 3,5/2) + 2,0 \cdot (5,52 - 3,5)^2/2 \\ &+ 2,0 \cdot (45,48 - 2,5)^2/2 + 75,0 \cdot (45,48 - 2,5/2) = 5762,38 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Elastizitätsmodul: $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$

Streckgrenze: $f_{y,k} = 23,5 \text{ kN/cm}^2$

Eigengewicht:

$$g_{k,1} = A_{ges} \cdot \varrho = 322,5 \text{ cm}^2 \cdot 7,85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \approx 2,53 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

7.5.2 Kranschiene

Für die Kranschiene Form A 75 sind folgende Werte gegeben:

Schienenkopfbreite:	b_r	= 75 mm
Schienenkopfhöhe:	t_r	= 35 mm
Schienenhöhe:	h_r	= 85 mm; $h_r^* = 77 \text{ mm}$ (25% Abnutzung)
Schienenfußbreite:	b_{fr}	= 200 mm
Flächenträgheitsmoment:	I_r	= 401 cm ⁴
Eigengewicht:	$g_{k,2}$	= 0,56 kN/m

Die Schiene zählt nicht zum tragenden Querschnitt.

7.6 Schnittgrößen

7.6.1 Aufteilung der äußeren Schnittgrößen

Wie in Abschnitt 4.3.2.1 gezeigt, können Schnittgrößen einzelnen Querschnittsteilen zugewiesen werden.

Mit den auf den Schubmittelpunkt bezogen Exzentrizitäten:

$$e_y = 0,25 b_r = 0,25 \cdot 7,5 \text{ cm} = 1,88 \text{ cm}$$

$$e_z = e_o - z_m + h_r = 19,68 - 9,54 + 8,50 = 18,64 \text{ cm}$$

und dem Abstand der Flanschschwerpunkte:

$$h_f = h - \frac{t_{fo}}{2} - \frac{t_{fu}}{2} = 51,0 \text{ cm} - \frac{3,5 \text{ cm}}{2} - \frac{2,5 \text{ cm}}{2} = 48 \text{ cm}$$

ergeben sich nach Abb. 4-3 und Tabelle 7-1 folgende horizontalen Kräfte für:

Lastgruppe 1:

a) Obergurt:

$$\begin{aligned} H_{fo} &= H_M + H \cdot \frac{I_{z,fo}}{I_z} = \frac{M_t}{h_f} + H \cdot \frac{I_{z,fo}}{I_z} = \frac{H \cdot e_z + Q_R \cdot e_y}{h_f} + H \cdot \frac{I_{z,fo}}{I_z} \\ &= \frac{40,2 \text{ kN} \cdot 18,64 \text{ cm} + 241,4 \text{ kN} \cdot 1,88 \text{ cm}}{48 \text{ cm}} + 40,2 \text{ kN} \cdot \frac{26578,1 \text{ cm}^4}{32203,1 \text{ cm}^4} \\ &= 25,07 \text{ kN} + 33,18 \text{ kN} = 58,25 \text{ kN} \end{aligned}$$

Untergurt:

$$\begin{aligned} H_{fu} &= -H_M + H \cdot \frac{I_{z,fu}}{I_z} = -\frac{M_t}{h_f} + H \cdot \frac{I_{z,fu}}{I_z} = -\frac{H \cdot e_z + Q_R \cdot e_y}{h_f} \\ &+ H \cdot \frac{I_{z,fu}}{I_z} = -25,07 \text{ kN} + 40,2 \text{ kN} \cdot \frac{5625,0 \text{ cm}^4}{32203,1 \text{ cm}^4} = -18,05 \text{ kN} \end{aligned}$$

Lastgruppe 5:

a) Obergurt:

$$\begin{aligned}
 H_{fo} &= H_M + H \cdot \frac{I_{z,fo}}{I_z} = \frac{M_t}{h_f} + H \cdot \frac{I_{z,fo}}{I_z} = \frac{H \cdot e_z + Q_R \cdot e_y}{h_f} + H \cdot \frac{I_{z,fo}}{I_z} \\
 &= \frac{60,6 \text{ kN} \cdot 18,64 \text{ cm} + 199,1 \text{ kN} \cdot 1,88 \text{ cm}}{48 \text{ cm}} + 60,6 \text{ kN} \cdot \frac{26578,1 \text{ cm}^4}{32203,1 \text{ cm}^4} \\
 &= 31,33 \text{ kN} + 50,01 \text{ kN} = 81,34 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Untergurt:

$$\begin{aligned}
 H_{fu} &= -H_M + H \cdot \frac{I_{z,fu}}{I_z} = -\frac{M_t}{h_f} + H \cdot \frac{I_{z,fu}}{I_z} = -\frac{H \cdot e_z + Q_R \cdot e_y}{h_f} \\
 &+ H \cdot \frac{I_{z,fu}}{I_z} = -31,33 \text{ kN} + 60,6 \text{ kN} \cdot \frac{5625,0 \text{ cm}^4}{32203,1 \text{ cm}^4} = -20,74 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Für die Ermittlung der Schnittgrößen werden folgende charakteristische Einwirkungen herangezogen:

	$Q_{r,max}$	$H_{L,i}$	H_{fo}	H_{fu}
Lastgruppe 1	241,6	14,3	58,25	-18,05
Lastgruppe 5	199,1	-	81,34	-20,74

Tabelle 7-2: maßgebende charakteristische Einwirkungen [kN]

7.6.2 Schnittgrößenermittlung

7.6.2.1 Eigengewicht

Infolge des Eigengewichtes von Kranbahnträger und Kranschiene:

$$g_{k,ges} = g_{k,1} + g_{k,2} = 2,53 \text{ kN/m} + 0,56 \text{ kN/m} \approx 3,1 \text{ kN/m}$$

treten Schnittgrößen nach Tabelle 7-3 auf.

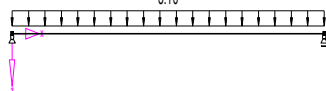
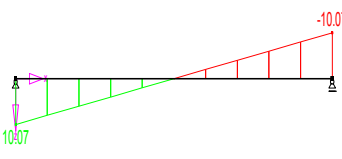
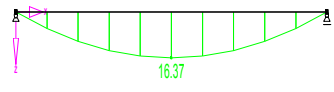
Belastung	V_z	M_y
	 <p>Max Q:3: 10.07, Min Q:3: -10.07 kN</p> <p>$V_{z,G} = \pm 10,07 \text{ kN}$</p>	 <p>Max M2: 16.37 kNm</p> <p>$M_{y,G} = 16,37 \text{ kNm}$</p>

Tabelle 7-3: charakteristische Schnittgrößen infolge Eigengewicht mit [13]

7.6.2.2 Kraneinwirkungen

Infolge der Einwirkungen aus Kranbetrieb treten folgende Schnittgrößen auf:

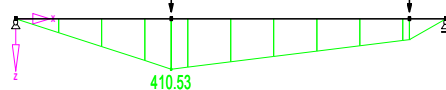
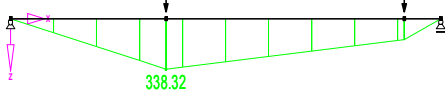
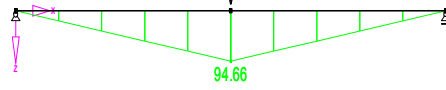
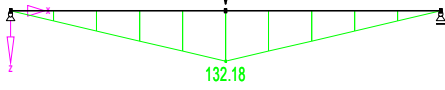
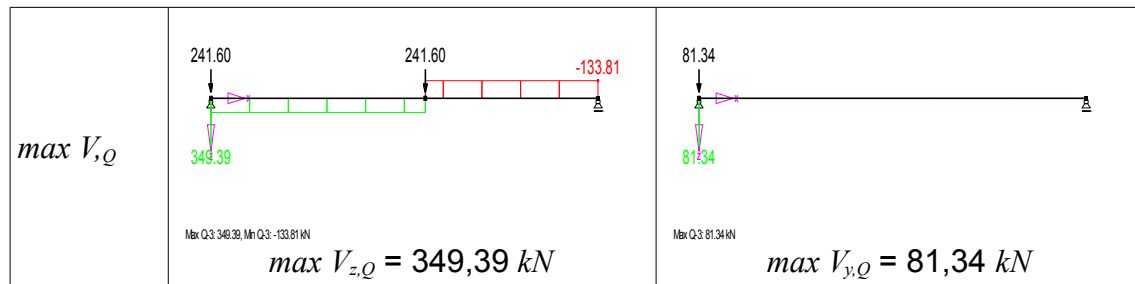
	Lastgruppe 1	Lastgruppe 5
$\max M_{y,Q}$	 <p>Max M2: 410.53 kNm</p> <p>$\max M_{y,Q} = 410,53 \text{ kNm}$</p> <p>zugehörige Schnittgrößen</p> <p>$M_{fo,z,Q} = 87,40 \text{ kNm}$</p> <p>$M_{fu,z,Q} = 27,08 \text{ kNm}$</p> <p>$V_{z,Q} = 174,70 \text{ kN}$</p>	 <p>Max M2: 338.32 kNm</p> <p>$\max M_{y,Q} = 338,32 \text{ kNm}$</p> <p>zugehörige Schnittgrößen</p> <p>$M_{fo,z,Q} = 122,04 \text{ kNm}$</p> <p>$M_{fu,z,Q} = 31,12 \text{ kNm}$</p> <p>$V_{z,Q} = 143,96 \text{ kN}$</p>
$\max M_{fo,z,Q}$	 <p>Max M2: 94.66 kNm</p> <p>$\max M_{fo,z,Q} = 94,66 \text{ kNm}$</p> <p>zugehörige Schnittgrößen</p> <p>$M_{y,Q} = 392,60 \text{ kNm}$</p> <p>$M_{fu,z,Q} = 29,33 \text{ kNm}$</p> <p>$V_{z,Q} = 120,80 \text{ kN}$</p>	 <p>Max M2: 132.18 kNm</p> <p>$\max M_{fo,z,Q} = 132,18 \text{ kNm}$</p> <p>zugehörige Schnittgrößen</p> <p>$M_{y,Q} = 323,54 \text{ kNm}$</p> <p>$M_{fu,z,Q} = 33,70 \text{ kNm}$</p> <p>$V_{z,Q} = 99,55 \text{ kN}$</p>

Tabelle 7-4: charakteristische Schnittgrößen infolge Kranbetrieb mit [13]

Fortsetzung Tabelle 7-4



7.7 Querschnittsnachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit

7.7.1 Untersuchung der Querschnittsklassen

Die Zuordnung der Querschnittsteile erfolgt nach DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2, dabei wird für den Oberflansch reine Druckbeanspruchung angenommen und der Steg wird unter Druck- und Biegebeanspruchung betrachtet.

Für den Oberflansch gilt für die Querschnittsklasse 1:

$$c/t < 9 \cdot \varepsilon \quad \varepsilon = 1,0 \text{ für S 235}$$

mit $t_{fo} = 3,5 \text{ cm}$ und $c = (b_{fo} - t_w)/2 = (45,0 \text{ cm} - 2,0 \text{ cm})/2 = 21,5 \text{ cm}$

auf der sicheren Seite liegend ohne Berücksichtigung von Schweißnähten.

$$c/t = 21,5/3,5 = 6,14 < 9 \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

Für den Steg gilt für die Querschnittsklasse 1:

$$\text{für } \alpha > 0,5: \quad c/t \leq \frac{396 \varepsilon}{13 \alpha - 1}$$

$$\text{für } \alpha \leq 0,5: \quad c/t \leq \frac{36 \varepsilon}{\alpha}$$

mit $\alpha \cdot c = (e_{pl,o} - t_{fo}) = (5,52 \text{ cm} - 3,5 \text{ cm}) \cdot c = 2,02 \text{ cm} \cdot c$

und $c = 45 \text{ cm}$, $t_w = 2,0 \text{ cm}$

erhält man, auf der sicheren Seite liegend ohne Berücksichtigung von Schweißnähten, für α :

$$\alpha = \frac{2,02}{45} = 0,045 < 0,5$$

und somit:

$$c/t = \frac{45}{2} = 22,5 < \frac{36}{0,045} = 800 \quad \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

Der Querschnitt kann Querschnittsklasse 1 zugeordnet werden, d.h. es dürfen plastische Querschnittsbeanspruchbarkeiten angesetzt werden. Für Kranbahnträger wird allerdings das elastische Nachweisverfahren empfohlen.

7.7.2 Querkraftnachweis

Nach Tabellen 7-3 und 7-4 resultiert die maximale Querkraft in z-Richtung aus Eigengewicht und Lastgruppe 1:

$$V_{z,Ed} = \gamma_G \cdot V_{z,G} + \gamma_Q \cdot V_{z,Q} = 1,35 \cdot 10,07 \text{ kN} + 1,35 \cdot 349,39 \text{ kN} = 485,27 \text{ kN}$$

Für die elastische Querkraftbeanspruchbarkeit gilt:

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \gamma_{M0})} \leq 1,0$$

τ_{Ed} kann für den Steg wie folgt ermittelt werden:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{z,Ed} \cdot S_y}{I_y \cdot t_w} = \frac{485,27 \text{ kN} \cdot 3085,76 \text{ cm}^3}{137431,4 \text{ cm}^4 \cdot 2,0 \text{ cm}} = 5,45 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{5,45 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2 / (\sqrt{3} \cdot 1,0)} = 0,40 \leq 1,0 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

τ_{Ed} kann für den Oberflansch mit Lastgruppe 5 wie folgt ermittelt werden:

$$V_{fo,y,Ed} = \gamma_Q \cdot V_{fo,y,Q} = 1,35 \cdot 81,34 \text{ kN} = 109,81 \text{ kN}$$

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{fo,y,Ed} \cdot W_{fo,pl,z} / 2}{I_{z,fo} \cdot t_{fo}} = \frac{109,81 \text{ kN} \cdot 1771,87 \text{ cm}^3 / 2}{26578,1 \text{ cm}^4 \cdot 3,5 \text{ cm}} = 1,04 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{1,04 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2 / (\sqrt{3} \cdot 1,0)} = 0,07 \leq 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Da an der Stelle der maximalen Querkraftbeanspruchung keine Biegebeanspruchung auftritt, ist ein Interaktionsnachweis unnötig.

Für unausgesteifte Stegbleche ist zusätzlich ein Schubbeulnachweis nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 5 zu führen, wenn:

$$h_w / t_w > 72 \varepsilon / \eta \quad \text{mit } \eta = 1,2 \text{ und } \varepsilon = 1,0 \text{ für S 235}$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{45}{2} = 22,5 < \frac{72}{1,2} = 60 \rightarrow \text{kein zusätzlicher Nachweis nötig}$$

7.7.3 Spannungsnachweise

Im Allgemeinen werden beim Längsspannungsnachweis die äußeren Ecken der Flansche maßgebend. Die Biegemomente $\max M_y$ und $\max M_{fo,z}$ nach Tabelle 7-4 und das Moment infolge des Eigengewichts nach Tabelle 7-3 werden auf der sicheren Seite liegend überlagert, obwohl sie nicht in der selben Laststellung auftreten.

Für Lastgruppe 1 Oberflansch:

$$N_{Ed} = \gamma_Q \cdot H_{L,i} = 1,35 \cdot 14,3 \text{ kN} = 19,3 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} M_{y,Ed} &= \gamma_G \cdot M_{y,G} + \gamma_Q \cdot M_{y,Q} = 1,35 \cdot 16,37 \text{ kNm} + 1,35 \cdot 410,53 \text{ kNm} \\ &= 576,32 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$M_{fo,z,Ed} = \gamma_Q \cdot M_{fo,z,Q} = 1,35 \cdot 94,66 \text{ kNm} = 127,79 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_{fo}} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{fo,el,y}} + \frac{M_{fo,z,Ed}}{W_{fo,el,z}} = \frac{19,3 \text{ kN}}{157,5 \text{ cm}^2} + \frac{57632 \text{ kNcm}}{6983,30 \text{ cm}^3} + \frac{12779 \text{ kNcm}}{1181,25 \text{ cm}^3}$$

$$= 0,12 \text{ kN/cm}^2 + 8,25 \text{ kN/cm}^2 + 10,82 \text{ kN/cm}^2 = 19,2 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{Rd}} = \frac{19,2 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2} = 0,82 < 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Interaktion Biegemoment-Querkraft:

$$V_{z,Ed} = \gamma_Q \cdot V_{z,Q} = 1,35 \cdot 174,70 \text{ kN} = 235,85 \text{ kN}$$

mit $V_{z,Q}$ als zugehörige Querkraft nach Tabelle 7-4

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{235,85 \text{ kN}}{1465,31 \text{ kN}} = 0,16 < 0,5 \rightarrow \text{keine Interaktion nötig}$$

Lastgruppe 1 Unterflansch:

$$M_{y,Ed} = \gamma_G \cdot M_{y,G} + \gamma_Q \cdot M_{y,Q} = 1,35 \cdot 16,37 \text{ kNm} + 1,35 \cdot 410,53 \text{ kNm}$$

$$= 576,32 \text{ kNm}$$

$$M_{fu,z,Ed} = \gamma_Q \cdot M_{fu,z,Q} = 1,35 \cdot 29,33 \text{ kNm} = 39,59 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{fu,el,y}} + \frac{M_{fu,z,Ed}}{W_{fu,el,z}} = \frac{57632 \text{ kNcm}}{4387,98 \text{ cm}^3} + \frac{3959 \text{ kNcm}}{375,0 \text{ cm}^3}$$

$$= 13,13 \text{ kN/cm}^2 + 10,55 \text{ kN/cm}^2 = 23,68 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{Rd}} = \frac{23,68 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2} = 1,007 \approx 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Für Lastgruppe 5 Oberflansch:

$$N_{ed} = 0$$

$$M_{y,Ed} = \gamma_G \cdot M_{y,G} + \gamma_Q \cdot M_{y,Q} = 1,35 \cdot 16,37 \text{ kNm} + 1,35 \cdot 338,32 \text{ kNm}$$

$$= 478,83 \text{ kNm}$$

$$M_{fo,z,Ed} = \gamma_Q \cdot M_{fo,z,Q} = 1,35 \cdot 132,18 \text{ kNm} = 178,44 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{fo,el,y}} + \frac{M_{fo,z,Ed}}{W_{fo,el,z}} = \frac{47883 \text{ kNcm}}{6983,30 \text{ cm}^3} + \frac{17844 \text{ kNcm}}{1181,25 \text{ cm}^3}$$

$$= 6,86 \text{ kN/cm}^2 + 15,11 \text{ kN/cm}^2 = 21,97 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{Rd}} = \frac{21,97 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2} = 0,93 < 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Lastgruppe 5 Unterflansch:

$$M_{y,Ed} = \gamma_G \cdot M_{y,G} + \gamma_Q \cdot M_{y,Q} = 1,35 \cdot 16,37 \text{ kNm} + 1,35 \cdot 338,32 \text{ kNm}$$

$$= 478,83 \text{ kNm}$$

$$M_{fu,z,Ed} = \gamma_Q \cdot M_{fu,z,Q} = 1,35 \cdot 33,70 \text{ kNm} = 45,49 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{fu,el,y}} + \frac{M_{fu,z,Ed}}{W_{fu,el,z}} = \frac{47883 \text{ kNcm}}{4387,98 \text{ cm}^3} + \frac{4549 \text{ kNcm}}{375,0 \text{ cm}^3}$$

$$= 10,91 \text{ kN/cm}^2 + 12,13 \text{ kN/cm}^2 = 23,04 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{Rd}} = \frac{23,04 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2} = 0,98 < 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

7.7.4 Lokale Nachweise

7.7.4.1 Lokale vertikale Druckspannungen infolge Radlasteinleitung

Am oberen Stegrand entsteht infolge der Radlast eine Druckspannung:

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{l_{eff} t_w} \quad \text{mit} \quad l_{eff} = 4,25 [(I_r + I_{f,eff}) / t_w]^{1/3}$$

dabei ist:

$$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f \text{ aber } b_{eff} \leq b$$

mit $h_r = h_r^* = 77 \text{ mm}$; $I_r = 401 \text{ cm}^4$ (25% Abnutzung)

$$b_{eff} = 200 \text{ mm} + 77 \text{ mm} + 35 \text{ mm} = 312 \text{ mm} < 450 \text{ mm}$$

$$I_{f,eff} = \frac{b_{eff} \cdot t_{fo}^3}{12} = \frac{31,2 \text{ cm} \cdot 3,5^3 \text{ cm}^3}{12} = 111,47 \text{ cm}^4$$

Die effektive Lasteinleitungslänge ergibt sich zu:

$$l_{eff} = 4,25[(401 + 111,47)/2,0]^{1/3} = 25,11 \text{ cm}$$

und damit die Druckspannung:

$$\sigma_{oz,Ed} = -\frac{1,35 \cdot 241,6 \text{ kN}}{25,11 \text{ cm} \cdot 2,0 \text{ cm}} = -6,49 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{|\sigma_{oz,Ed}|}{\sigma_{Rd}} = \frac{6,49 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2} = 0,28 < 1,0$$

7.7.4.2 Lokale Schubspannung

$$\tau_{oxz,Ed} = 0,2 \sigma_{oz,Ed} = 0,2 \cdot 6,49 \text{ kN/cm}^2 = 1,3 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{|\tau_{oxz,Ed}|}{f_y I(\sqrt{3} \gamma_{M0})} = \frac{1,3 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2 / \sqrt{3} \cdot 1,0} = 0,09 \leq 1,0$$

7.7.4.3 Vergleichsspannung

Mit den ermittelten lokalen Spannungen und globalen Spannungen ist am oberen Stegrand ein Vergleichsspannungsnachweis für die Laststellung des maximalen Biegemoments und der maximalen Querkraft zu führen. Hier werden die Schnittgrößen beider Laststellungen kombiniert betrachtet. Man erhält folgende globale Spannungen:

$$\sigma_{x,Ed} = -\frac{M_{y,Ed}}{I_y} \cdot (e_o - t_{fo}) = -\frac{57632 \text{ kNcm}}{137431,4 \text{ cm}^4} \cdot (19,68 \text{ cm} - 3,5 \text{ cm})$$

$$= -6,78 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Druckspannung)}$$

$$\frac{|\sigma_{x,Ed}|}{\sigma_{Rd}} = \frac{6,78 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2} = 0,29 < 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{z,Ed} \cdot S_{f0,y}}{I_y \cdot t_w} = \frac{485,27 \text{ kN} \cdot 2823,97 \text{ cm}^3}{137431,4 \text{ cm}^4 \cdot 2,0 \text{ cm}} = 4,99 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \gamma_{M0})} = \frac{4,99 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2 / \sqrt{3} \cdot 1,0} = 0,37 \leq 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Der Vergleichsspannungsnachweis lautet dann wie folgt:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{oz,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\sigma_{oz,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed} + \tau_{oxz,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1 \\ & = (-0,29)^2 + (-0,28)^2 - (-0,29) \cdot (-0,28) + 3 \cdot (0,46)^2 = 0,72 < 1,0 \end{aligned}$$

7.7.5 Stabilitätsnachweise

7.7.5.1 Biegedrillknicknachweis

Nach EN 1993-6, 6.3.2.3 als Nachweis gegen Biegeknicken eines Druckstabes (mit Druckgurt und 1/5 des Steges). Der Nachweis ist für die Lastgruppen 1 und 5 zu führen, hier werden die jeweils maßgebenden Schnittgrößen kombiniert. Es wird vorausgesetzt, dass der Kranbahnträger an den Auflagern seitlich gehalten wird.

Für den betrachtete Querschnitt ergeben sich folgende Querschnittswerte:

$$A = A_{f0} + 0,2 h_w \cdot t_w = 157,5 \text{ cm}^2 + 0,2 \cdot 45,0 \text{ cm} \cdot 2,0 \text{ cm} = 175,5 \text{ cm}^2$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_{f0,z}}{A}} = \sqrt{\frac{26578,1 \text{ cm}^4}{175,5 \text{ cm}}} = 12,3 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned}
 S_y &= S_{f_0,y} + 0,2 h_w \cdot t_w \cdot (e_o - t_{f_0} - 0,1 h_w) \\
 &= 2823,97 \text{ cm}^3 + 0,2 \cdot 45,0 \text{ cm} \cdot 2,0 \text{ cm} \cdot (19,68 \text{ cm} - 3,5 \text{ cm} - 0,1 \cdot 45,0 \text{ cm}) \\
 &= 3034,21 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

und folgende Schnittgrößen:

$$\begin{aligned}
 N_{f_0,Ed} &= \frac{M_{y,Ed}}{I_y} \cdot S_y = \frac{57632 \text{ kNcm}}{137431,4 \text{ cm}^4} \cdot 3034,21 \text{ cm}^3 = 1272,4 \text{ kN} \\
 M_{f_0,z,Ed} &= \gamma_Q \cdot M_{f_0,z,Q} = 1,35 \cdot 132,18 \text{ kNm} = 178,44 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Der Nachweis ist auf folgende Art zu führen:

$$\frac{N_{f_0,Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{k_{z,z} \cdot M_{f_0,z,Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

mit
$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{21000 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2}} = 93,9$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_{z,Og} \lambda_1} = \frac{650 \text{ cm}}{12,3 \text{ cm} \cdot 93,9} = 0,56$$

$\alpha = 0,49$ (nach EN 1993-1-1 Tabellen 6.1 und 6.2: geschweißter Querschnitt, Ausweichen \perp zur z-z Achse --> Knicklinie c)

$$\Phi = 0,5 \left[1 + 0,49 (0,56 - 0,2) + 0,56^2 \right] = 0,75$$

$$\chi_z = \frac{1}{0,75 + \sqrt{0,75 - 0,56^2}} = 0,71 < 1,0$$

erhält man für:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_z A_{Og} f_y}{\gamma_{MI}} = \frac{0,71 \cdot 175,5 \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,1} = 2662,0 \text{ kN}$$

Der Interaktionswert ergibt sich zu:

$$\begin{aligned}
k_{z,z} &= C_{mz} \left(1 + (2 \bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Og,Ed} \gamma_{M1}}{\chi_z A_{og} f_y} \right) \leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Og,Ed} \gamma_{M1}}{\chi_z A_{og} f_y} \right) \\
&= 0,9 \left(1 + (2 \cdot 0,56 - 0,6) \frac{1272,4 \text{ kN} \cdot 1,1}{0,71 \cdot 175,5 \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2} \right) = 1,12 \\
&\leq 0,9 \left(1 + 1,4 \frac{1272,4 \text{ kN} \cdot 1,1}{0,71 \cdot 175,5 \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2} \right) = 1,50
\end{aligned}$$

Der Bemessungswert der Biegedrillknickbeanspruchbarkeit wird wie folgt berechnet:

$$M_{b,Rd} = \frac{W_{fo,pl,z} f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{1771,87 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,1} = 37853,6 \text{ kNcm}$$

Der Nachweis lautet wie folgt:

$$\frac{1272,4}{2662,0} + \frac{1,12 \cdot 17844}{37853,6} \leq 0,48 + 0,53 = 1,01 \approx 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

7.7.6 Beulnachweise

7.7.6.1 Beanspruchbarkeit des Steges unter Querbelastung

Es werden die Radlasten der Lastgruppe 1 für den Nachweis des Steges infolge konzentrierter Lasteinleitung verwendet. Für den Abstand der Quersteifen wird $l/4 = 6,50 \text{ m}/4 = 1,625 \text{ m}$ gewählt. Die zu verwendende effektive Länge l_{eff} entspricht nicht derjenigen aus dem Nachweis der lokalen vertikalen Druckspannungen und ist wie folgt zu ermitteln:

$$L_{eff} = \chi_F l_y \quad \text{mit} \quad \chi_F = 0,5 / \bar{\lambda}_F \leq 1,0$$

dafür sind zu berechnen:

$$s_s = l_{eff} - 2 t_f = 25,11 - 2 \cdot 3,5 = 18,11 \text{ cm}$$

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} = \frac{23,5 \text{ kN/cm}^2 \cdot 45,0 \text{ cm}}{23,5 \text{ kN/cm}^2 \cdot 2,0 \text{ cm}} = 22,5$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_r} \right)^2 = 0,02 \left(\frac{45,0 \text{ cm}}{3,5 \text{ cm}} \right)^2 = 3,3 \quad \text{für } \bar{\lambda}_f > 0,5$$

$$m_2 = 0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_f \leq 0,5$$

Annahme: $\bar{\lambda}_f \leq 0,5$

$$l_y = s_s + 2 t_f \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right) = 18,11 \text{ cm} + 2 \cdot 3,5 \text{ cm} \left(1 + \sqrt{22,5} \right) \\ = 58,31 \text{ cm} \leq 162,5 \text{ cm}$$

$$k_F = 6 + 2 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 = 6 + 2 \left(\frac{45,0 \text{ cm}}{162,5 \text{ cm}} \right)^2 = 6,55$$

$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} = 0,9 \cdot 6,55 \cdot 21000 \text{ kN/cm}^2 \cdot \frac{2,0^3 \text{ cm}^3}{45 \text{ cm}} = 22008 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{f_{yw} t_w l_y}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{23,5 \text{ kN/cm}^2 \cdot 2,0 \text{ cm} \cdot 58,31 \text{ cm}}{22008 \text{ kN}}} = 0,35 < 0,5$$

$$\chi_F = 0,5 / \bar{\lambda}_F = \frac{0,5}{0,35} = 1,43 \leq 1,0$$

Damit ergibt sich:

$$L_{eff} = \chi_F l_y = 1,0 \cdot 58,31 \text{ cm} = 58,31 \text{ cm}$$

Der Nachweis ist zu führen mit:

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} l_{eff} t_w}{\gamma_{MI}} = \frac{23,5 \text{ kN/cm}^2 \cdot 58,11 \text{ cm} \cdot 2,0 \text{ cm}}{1,1} = 2482,9 \text{ kN}$$

$$F_{z,Ed} = \gamma_Q \cdot Q_{r,max} = 1,35 \cdot 241,6 \text{ kN} = 326,16 \text{ kN}$$

und lautet wie folgt:

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{\frac{f_y l_{eff} t_w}{\gamma_{MI}}} = \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} = \frac{326,16 \text{ kN}}{2482,9 \text{ kN}} = 0,13 \leq 1,0 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Bei dem zusätzlich zu führenden Interaktionsnachweis für Beulen infolge der lokalen Lasteinleitung und Beulen infolge der Biegenormalspannung ist nachzuweisen, dass:

$$\eta_2 + 0,8 \eta_1 \leq 1,4$$

mit:
$$\eta_1 = \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{M_{y,Ed} \gamma_{M0}}{f_y W_{y,eff}} = \frac{57632 \text{ kNcm} \cdot 1,0}{6983,3 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2} = 0,35$$

Der Interaktionsnachweis lautet:

$$0,13 + 0,8 \cdot 0,35 = 0,41 \leq 1,4 \quad \text{--> Nachweis erfüllt}$$

7.7.6.2 Flanschinduziertes Stegblechbeulen

Ein Einknicken des Druckgurtes in den Steg gilt als vermieden wenn:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_y} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$$

$$\frac{45,0 \text{ cm}}{2,0 \text{ cm}} = 22,5 \leq 0,40 \cdot \frac{21000 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2} \sqrt{\frac{90 \text{ cm}^2}{157,5 \text{ cm}^2}} = 270,2$$

--> Bedingung erfüllt (für plastische Querschnittstragfähigkeit und damit ebenfalls für elastische Querschnittstragfähigkeit)

7.7.6.3 Beulnachweis der Druckflansche

Der Nachweis wurde unter 7.7.1 mit:

$$c/t \leq \text{grenz } c/t$$

geführt.

7.8 Gebrauchstauglichkeitsnachweise

7.8.1 Vertikale Durchbiegung

Die Durchbiegung (mit Eigengewicht) kann wie folgt ermittelt werden:

$$\delta_z = \frac{\gamma}{100} \cdot \frac{F \cdot l^3}{EI_y} + \beta \frac{g l^4}{EI_y}$$

mit $\beta = 0,0130$ (Einfeldträger);

$\gamma = 2,62$ nach Tabelle 4-4 für $a/l = 3,60/6,50 = 0,55$;

$F = \gamma_{Q,ser} \cdot Q_{r,max} = 1,0 \cdot 199,1 \text{ kN}$ nach Tabelle 7-1, Lastgruppe 11

$$\begin{aligned} \delta_z &= \frac{2,62}{100} \cdot \frac{199,1 \text{ kN} \cdot (650 \text{ cm})^3}{21000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 137431,4 \text{ cm}^4} \\ &+ 0,013 \cdot \frac{0,031 \text{ kN/cm} \cdot (650 \text{ cm})^4}{21000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 137431,4 \text{ cm}^4} = 0,49 \text{ cm} + 0,02 \text{ cm} = 0,51 \text{ cm} \\ 0,51 \text{ cm} &< \frac{L}{500} = \frac{650 \text{ cm}}{500} = 1,30 \text{ cm} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt} \end{aligned}$$

7.8.2 Horizontale Durchbiegung

Für die horizontale Durchbiegung wird die dem Oberflansch zugewiesene Horizontalkraft H_{fo} aus Lastgruppe 5 nach Tabelle 7-2 betrachtet:

$$\begin{aligned} \delta_y &= \frac{1}{48} \cdot \frac{H_{fo} \cdot l^3}{EI_{z,og}} = \frac{1}{48} \cdot \frac{81,34 \text{ kN} \cdot (650 \text{ cm})^3}{21000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 26578,1 \text{ cm}^4} = 0,83 \text{ cm} \\ 0,83 \text{ cm} &< \frac{L}{600} = \frac{650 \text{ cm}}{600} = 1,08 \text{ cm} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt} \end{aligned}$$

Nach DIN EN 1993-6, Tabelle 7.1 gilt für die Änderung der Schwerlinien der Kranschienen:

$$\Delta s < 10 \text{ mm}$$

diese Forderung wäre für $\Delta s = 2 \cdot \delta_y = 2 \cdot 0,83 \text{ mm} = 1,66 \text{ mm}$ nicht erfüllt, bei dem vorhandenen Spurspiel von 20 mm können, nach Rücksprache mit Kranhersteller und Bauherren, auch größere Verformungsgrenzwerte vereinbart werden.

7.8.3 Begrenzung des Stegblechatmens

In Stegblechen ohne Längssteifen kann Stegblechatmen vernachlässigt werden, wenn:

$$\frac{b_w}{t_w} \leq 120 \quad \text{mit} \quad b_w = \text{Stegblechhöhe}$$

$$\frac{b_w}{t_w} = \frac{45,0}{2,0} = 22,5 \leq 120 \quad \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

7.8.4 Schwingung des Unterflansches

Horizontale Schwingungen der Unterflansche von Kranbahnträgern sind zu vermeiden, dies gilt als erfüllt, wenn:

$$\frac{L}{i_z} \leq 250$$

Mit
$$i_{fu,z} = \sqrt{\frac{I_{fu,z}}{A_{fu}}} = \sqrt{\frac{5625,0 \text{ cm}^4}{75 \text{ cm}}} = 8,66 \text{ cm}$$

gilt:
$$\frac{650 \text{ cm}}{8,66 \text{ cm}} = 75 \leq 250 \quad \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

7.8.5 Nachweis für elastisches Verhalten

Da für die Flansche bereits elastische Spannungsnachweise geführt wurden und für den Steg der Vergleichsspannungsnachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit erfüllt wurde, wird kein zusätzlicher Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit geführt.

7.9 Ermüdungsnachweis

7.9.1 Allgemeines

Für den Ermüdungsnachweis werden folgende Angaben gemacht:

Teilsicherheitsbeiwerte: $\gamma_{Ff} = 1,0$

$$\gamma_{Mf} = 1,15$$

7.9.2 Ermüdungsbelastung

Mit den dynamischen Vergrößerungsfaktoren:

$$\varphi_{fat,1} = \frac{(1 + \varphi_1)}{2} = \frac{(1 + 1,1)}{2} = 1,05$$

$$\varphi_{fat,2} = \frac{(1 + \varphi_2)}{2} = \frac{(1 + 1,26)}{2} = 1,13$$

und der maximalen Radlast des belasteten Krans pro Rad:

$$Q_{r,max} = \varphi_i \cdot 57,25 \text{ kN} + \varphi_j \cdot 141,8 \text{ kN} \quad \text{nach 7.2.1.1}$$

erhält man folgende Ermüdungsbelastung:

$$F_{Ed} = \gamma_{Ff} (\varphi_{fat,1} \cdot Q_c + \varphi_{fat,2} \cdot Q_h)$$

$$F_{Ed} = 1,0 \cdot (1,05 \cdot 57,25 \text{ kN} + 1,13 \cdot 141,8 \text{ kN}) = 60,11 \text{ kN} + 160,23 \text{ kN}$$

$$= 220,34 \text{ kN}$$

In der kritischen Laststellung (bei $x = 2,35 \text{ m}$) tritt damit folgendes Biegemoment $M_{y,Ed}$ auf:

$$M_{y,Ed} = \frac{F_{Ed} \cdot l}{8} \cdot \left(2 - \frac{a}{l}\right)^2 = \frac{220,34 \text{ kN} \cdot 6,50 \text{ m}}{8} \cdot \left(2 - \frac{3,60 \text{ m}}{6,50 \text{ m}}\right)^2 = 374,4 \text{ kNm}$$

7.9.3 Ermüdungsnachweise

7.9.3.1 Nachweis für globale Längsspannungen

Der Nachweis soll für den Übergang Oberflansch-Steg geführt werden, dazu ist die Spannungsschwingbreite zu ermitteln:

$$\sigma_{x,max} = -\frac{M_{y,Ed}}{I_y} \cdot (e_o - t_{fo}) = -\frac{37440 \text{ kNcm}}{137431,4 \text{ cm}^4} \cdot (19,68 \text{ cm} - 3,5 \text{ cm})$$
$$= -4,41 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,min} = 0$$

$$\Delta \sigma_x = |\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}| = |-4,41 - 0| = 4,41 \text{ kN/cm}^2$$

Da $\max M_{y,Ed}$ während einer Kranüberfahrt nur einmal auftritt, entspricht dies einem Spannungszyklus.

Die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite ergibt sich mit $\lambda = 0,5$ für S 4 nach Tabelle 5-2 wie folgt:

$$\Delta \sigma_{E,2,x} = \lambda \Delta \sigma_x = 0,5 \cdot 4,41 \text{ kN/cm}^2 = 2,21 \text{ kN/cm}^2$$

Unter der Annahme, dass die Schweißnaht mittels Schweißautomaten beidseitig durchgeschweißt erzeugt wird und keine Schweißansatzstellen vorhanden sind, kann nach DIN EN 1993-1-9, Tabelle 8.2, Zeile 1 Kerbfall 125 angenommen werden.

Der Nachweis lautet somit:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2,x}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 2,21 \text{ kN/cm}^2}{12,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,2 \leq 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

7.9.3.2 Nachweis für lokale Spannungen infolge Radlasten

Lokale Druckspannung:

Für lokale Druckspannungen am oberen Stegrand gilt:

$$\sigma_{oz, Ed} = \frac{F_{z, Ed}}{l_{eff} t_w} \quad \text{mit} \quad l_{eff} = 25,11 \text{ cm} \quad \text{siehe 7.7.4.1}$$

$$\sigma_{oz, Ed} = -\frac{220,34 \text{ kN}}{25,11 \text{ cm} \cdot 2,0 \text{ cm}} = -4,39 \text{ kN/cm}^2 = \sigma_{oz, Ed, max}$$

$$\sigma_{oz, Ed, min} = 0$$

Lokale Biegespannung:

Infolge exzentrischer Radlasteinleitung sind im Ermüdungsnachweis Biegespannungen des Steges zu berücksichtigen.

Das Torsionsmoment T_{Ed} ergibt sich zu:

$$T_{Ed} = F_{z, Ed} \cdot e_y \quad \text{mit} \quad e_y = 0,25 b_r = 1,88 \text{ cm} \geq 0,5 t_w = 1,0 \text{ cm}$$

$$T_{Ed} = 220,34 \text{ kN} \cdot 1,88 \text{ cm} = 414,24 \text{ kNcm} = 4,14 \text{ kNm}$$

Mit

$$\eta = \left[\frac{0,75 a t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\pi h_w / a)}{\sinh(2\pi h_w / a) - 2\pi h_w / a} \right]^{0,5}$$

$$\eta = \left[\frac{0,75 \cdot 162,5 \text{ cm} \cdot 2,0^3 \text{ cm}^3}{(45,0 \text{ cm} \cdot 3,5^3 \text{ cm}^3) / 3} \cdot \frac{\sinh^2\left(\frac{\pi \cdot 45,0 \text{ cm}}{162,5 \text{ cm}}\right)}{\sinh\left(\frac{2\pi \cdot 45,0 \text{ cm}}{162,5 \text{ cm}}\right) - 2\pi \cdot \frac{45,0 \text{ cm}}{162,5 \text{ cm}}} \right]^{0,5}$$

$$= \left(1,516 \cdot \frac{0,968}{2,761 - 1,739} \right)^{0,5} = 1,2$$

kann die lokale Biegespannung wie folgt bestimmt werden:

$$\sigma_{T, Ed} = \frac{6 T_{Ed}}{a t_w^2} \eta \tanh(\eta)$$

$$\sigma_{T, Ed} = \frac{6 \cdot 414,24 \text{ kNcm}}{162,5 \text{ cm} \cdot 2,0^2 \text{ cm}^2} \cdot 1,2 \tanh(1,2) = \pm 3,83 \text{ kN/cm}^2 = \sigma_{T, Ed, max}$$

$$\sigma_{T, Ed, min} = 0$$

Die beiden maximalen Werte sind zur Ermittlung der Spannungsschwingbreite wie folgt zu verwenden:

$$\Delta \sigma_z = \sigma_{oz, max} + \sigma_{T, max} = 4,41 + 3,83 = 8,24 \text{ kN/cm}^2$$

man erhält damit:

$$\Delta \sigma_{E,2,z} = \lambda \Delta \sigma_z = 0,5 \cdot 8,24 \text{ kN/cm}^2 = 4,12 \text{ kN/cm}^2$$

Nach DIN EN 1993-1-9, Tabelle 8.10, Zeile 2 kann für die DHV-Naht Kerbfall 71 angenommen werden.

Der Nachweis lautet dann:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2,z}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 4,12 \text{ kN/cm}^2}{7,1 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,68 \leq 1,0$$

Da die lokalen Spannungen durch die Radlast direkt hervorgehen, treten bei einer Kranüberfahrt an einem betrachteten Punkt infolge der beiden Radlasten auch zwei Spannungszyklen auf. Dies kann durch Verwendung eines um eine Klasse erhöhten λ -Wertes berücksichtigt werden. Der entsprechende Nachweis lautet dann:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2,z}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 5,19 \text{ kN/cm}^2}{7,1 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,84 \leq 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

mit $\Delta \sigma_{E,2,z} = \lambda \Delta \sigma_z = 0,63 \cdot 8,24 \text{ kN/cm}^2 = 5,19 \text{ kN/cm}^2$

Lokale Schubspannungen:

Lokale Schubspannungen infolge Radlasteinleitung sind wie unter 7.7.4.2 zu ermitteln:

$$\tau_{oxz, Ed} = \pm 0,2 \sigma_{oz, Ed} = \pm 0,2 \cdot 4,39 \text{ kN/cm}^2 = \pm 0,88 \text{ kN/cm}^2$$

Die Spannungsschwingbreite beträgt:

$$\Delta \tau_{oxz, Ed} = |\tau_{xz, Ed, max} - \tau_{xz, Ed, min}| = |0,88 - (-0,88)| = 1,76 \text{ kN/cm}^2$$

Dass auch hier bei einer Überfahrt zwei Spannungsspitzen auftreten, wird durch

Verwendung eines erhöhten λ -Wertes bei der Ermittlung der schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite berücksichtigt.

Globale Schubspannungen:

Die globalen Schubspannungen können in Abhängigkeit der Querkraft am Punkt $x = 2,35 \text{ m}$ berechnet werden. Lässt man den Kran von links nach rechts über den Kranbahnträger fahren, wobei die Räder den Träger verlassen können, verursacht das erste Rad beim Erreichen des Punktes x die folgende Querkraft (Abb. 7-5):

$$V_{z,Ed,min} = F_{Ed} \cdot \frac{x}{l} = 220,34 \text{ kN} \cdot \frac{2,35 \text{ m}}{6,50 \text{ m}} = -79,66 \text{ kN}$$

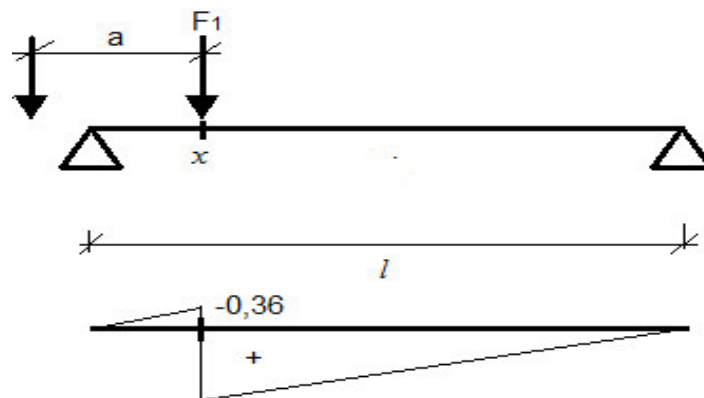


Abb. 7-5: Laststellung für minimale Querkraft und die Einflusslinie, eigene Zeichnung

Die maximale Querkraft tritt auf, wenn das zweite Rad den Punkt x erreicht (Abb. 7-6):

$$\begin{aligned} V_{z,Ed,max} &= F_{Ed} \cdot \left(\frac{(l-x)}{l} + \frac{(l-x+a)}{l} \right) \\ &= 220,34 \text{ kN} \cdot \left(\frac{(6,50 \text{ m} - 2,35 \text{ m})}{6,50 \text{ m}} + \frac{(6,50 \text{ m} - 2,35 \text{ m} + 3,60 \text{ m})}{6,50 \text{ m}} \right) \\ &= 159,32 \text{ kN} \end{aligned}$$

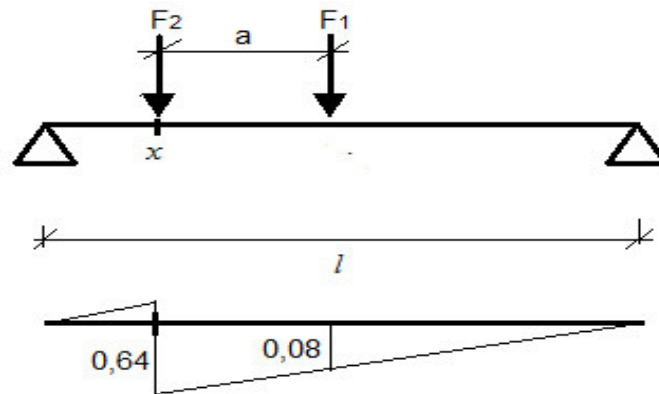


Abb. 7-6: Laststellung für maximale Querkraft und die Einflusslinie, eigene Zeichnung

Damit ergibt sich die minimale globale Schubspannung zu:

$$\tau_{xz, Ed, min} = \frac{V_{z, Ed, min} \cdot S_{fo, y}}{I_y \cdot t_w} = \frac{-79,66 \text{ kN} \cdot 2823,97 \text{ cm}^3}{137431,4 \text{ cm}^4 \cdot 2,0 \text{ cm}} = -0,82 \text{ kN/cm}^2$$

und die maximale globale Schubspannung zu:

$$\tau_{xz, Ed, max} = \frac{V_{z, Ed, max} \cdot S_{fo, y}}{I_y \cdot t_w} = \frac{159,32 \text{ kN} \cdot 2823,97 \text{ cm}^3}{137431,4 \text{ cm}^4 \cdot 2,0 \text{ cm}} = 1,64 \text{ kN/cm}^2$$

Die Spannungsschwingbreite beträgt:

$$\Delta \tau_{xz, Ed} = |\tau_{xz, Ed, max} - \tau_{xz, Ed, min}| = |1,64 - (-0,82)| = 2,46 \text{ kN/cm}^2$$

Aus globalen und lokalen Schubspannungen ergibt sich folgende schadens-äquivalente Spannungsschwingbreite (mit λ -Wert für S 5, da zwei Spannungsspitzen pro Überfahrt):

$$\begin{aligned} \Delta \tau_{E,2} &= \lambda (\Delta \tau_{xz, Ed} + \Delta \tau_{oxz, Ed}) = 0,758 \cdot (2,46 \text{ kN/cm}^2 + 1,76 \text{ kN/cm}^2) \\ &= 3,2 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

Der Nachweis lautet für Kerbfall 80 nach EN 1993-1-9, Tabelle 8.5:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 3,2 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,46 \leq 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Der Interaktionsnachweis für die gleichzeitig auftretenden Spannungskomponenten lautet wie folgt:

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2,x}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2,z}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mf}} \right)^5 < 1,0$$

$$0,2^3 + 0,84^3 + 0,46^5 = 0,62 < 1,0 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Weitere Querschnittsstellen wie beispielsweise die Quersteifen sollen hier nicht betrachtet werden.

8 Zusammenfassung

Der ausgewählte Querschnitt erfüllt alle geführten Querschnitts- sowie Bauteilnachweise. Die konservative Nachweisführung führt zu Auslastungen von zum Teil 100%, beispielsweise beim Spannungsnachweis der Lastgruppe 1 für den Unterflansch:

$$\begin{aligned} M_{y,Ed} &= \gamma_G \cdot M_{y,G} + \gamma_Q \cdot M_{y,Q} = 1,35 \cdot 16,37 \text{ kNm} + 1,35 \cdot 410,53 \text{ kNm} \\ &= 576,32 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$M_{fu,z,Ed} = \gamma_Q \cdot M_{fu,z,Q} = 1,35 \cdot 29,33 \text{ kNm} = 39,59 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{x,Ed} &= \frac{M_{y,Ed}}{W_{fu,el,y}} + \frac{M_{fu,z,Ed}}{W_{fu,el,z}} = \frac{57632 \text{ kNcm}}{4387,98 \text{ cm}^3} + \frac{3959 \text{ kNcm}}{375,0 \text{ cm}^3} \\ &= 13,13 \text{ kN/cm}^2 + 10,55 \text{ kN/cm}^2 = 23,68 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{Rd}} = \frac{23,68 \text{ kN/cm}^2}{23,5 \text{ kN/cm}^2} = 1,007 \approx 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt.}$$

Die Verwendung plastischer Querschnittsbeanspruchbarkeiten führt zu geringeren Auslastungen, dies soll für den Unterflansch mit den Schnittgrößen der Lastgruppe 1 beispielhaft gezeigt werden:

$$\text{mit } M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5762,38 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 135415,9 \text{ kNcm}$$

$$\begin{aligned} \text{und } M_{fu,pl,z,Rd} &= \frac{W_{fu,pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{((30 \text{ cm})^2 \cdot 2,5 \text{ cm/4}) \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0} \\ &= 13218,7 \text{ kNcm} \end{aligned}$$

lautet der Nachweis:

$$\begin{aligned} \left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{fu,pl,z,Rd}} \right) &\leq 1 \\ \left(\frac{576,32 \text{ kNm}}{1354,16 \text{ kNm}} \right)^2 + \left(\frac{39,59 \text{ kNm}}{132,18 \text{ kNm}} \right) &= 0,48 \leq 1 \quad \text{Auslastungen 48\%.} \end{aligned}$$

Infolge der Nachweisführung mit plastischen Querschnittsbeanspruchbarkeiten, kann der Nachweis für elastisches Verhalten (auf Gebrauchstauglichkeitsniveau) maßgebend werden, wenn zu hohe Auslastungen, beispielsweise infolge einer Querschnittverkleinerung, zugelassen werden. Aus diesem Grund wurde die Vordimensionierung konservativ durchgeführt.

Beim Ermüdungsnachweis tritt die maßgebende Spannung als lokale Spannung infolge der Radlasteinleitung auf (siehe 7.9.3.2). Betrachtet man den Nachweis:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2,z}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 5,19 \text{ kN/cm}^2}{7,1 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,84 \leq 1,0$$

und die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite:

$$\Delta \sigma_{E,2,z} = \lambda \Delta \sigma_z = 0,63 \cdot 8,24 \text{ kN/cm}^2 = 5,19 \text{ kN/cm}^2$$

zeigt sich der Einfluss der Beanspruchungsklasse, ausgedrückt durch den λ -Wert, auf die Bemessung/Dimensionierung des Kranbahnträgers. Hätte man die Krananlage um eine Beanspruchungsklasse höher eingestuft, würde sich mit $\lambda = 0,794$ (für S 6) folgende schadensäquivalente Spannungsschwingbreite ergeben:

$$\Delta \sigma_{E,2,z} = \lambda \Delta \sigma_z = 0,794 \cdot 8,24 \text{ kN/cm}^2 = 6,51 \text{ kN/cm}^2$$

und der Nachweis:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2,z}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 6,51 \text{ kN/cm}^2}{7,1 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 1,06 \leq 1,0$$

wäre nicht erfüllt. Es ist im Vorfeld ein ermüdungsgerechter, also möglichst kerbarmer Querschnitt zu finden. In dem hier behandelten Beispiel hätte ein mit Winkeln verstärktes Walzprofil evtl. die vorteilhaftere Variante dargestellt, da im Bereich des Übergangs von Obergurt zu Steg keine Schweißnaht als Kerbfall zu betrachten wäre und somit die Kerbgruppe 160 angenommen werden könnte.

Normen und Literatur

Normen

- [1] DIN EN 1090-2 Eurocode: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Ausgabe 10/2011
- [2] DIN EN 1990 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Ausgabe 12/2010 (inkl. Nationaler Anhang)
- [3] DIN EN 1991-3 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen; Ausgabe 12/2010 (inkl. Nationaler Anhang) und Berichtigung 1 Ausgabe 08/2013
- [4] DIN EN 1993-1-1 Eurocode: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Ausgabe 12/2010 (inkl. Nationaler Anhang)
- [5] DIN EN 1993-1-5 Eurocode: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Ausgabe 12/2010 (inkl. Nationaler Anhang)
- [6] DIN EN 1993-1-9 Eurocode: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Ausgabe 12/2010 (inkl. Nationaler Anhang)
- [7] DIN EN 1993-6 Eurocode: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen; Ausgabe 12/2010 (inkl. Nationaler Anhang)
- [8] DIN EN 13001-2: Kransicherheit - Konstruktion allgemein - Teil 2: Lasteinwirkungen; Ausgabe 06/2012
- [9] DIN EN 15011: Krane – Brücken- und Portalkrane; Ausgabe 05/2011

Literatur

- [10] Seeßelberg C.: Kranbahnen Bemessung und konstruktive Gestaltung; 3. aktualisierte und erweiterte Auflage, Bauwerk Verlag; Berlin 2009
- [11] Kuhlmann U., Dürr A., Günter H.-P.: Kranbahnen und Betriebsfestigkeit; in Stahlbaukalender 2003, S.375-496; Ernst und Sohn Verlag; Berlin 2003

Hilfsmittel

- [12] Goris A. (Hrsg.): Schneider Bautabellen für Ingenieure; Werner Verlag; 17. Auflage; Neuwied 2006

Software

- [13] RSTAB Version 5.14; Ingenieur-Software Dlubal GmbH; Tiefenbach 2000;
- [14] DUENQ Version 5.14; Ingenieur-Software Dlubal GmbH; Tiefenbach 2000;
- [15] OpenOffice.org 3.4.1; Apache Software Foundation 2012;

Internetseiten

- [16] <http://www.peter-hebetechnik.de/produkte-laufkrane.php>; 05.06.2013
- [17] <http://www.peter-hebetechnik.de/produkte-haengebahnsysteme.php>; 05.06.2013
- [18] <http://www.peter-hebetechnik.de/produkte-schwenkkrane.php>; 05.06.2013
- [19] <http://www.peter-hebetechnik.de/produkte-portalkrane.php>; 05.06.2013
- [20] http://diglib.ethz.ch/system/temporary/get_erm.ind6.de.htm; 06.11.2013

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Marcus Zaak

Döbeln, 15.12.2013